

工學碩士 學位論文

석션이력을 고려한 불포화토 거동 특성

Behavior Characteristics of Unsaturated Soils
Considering Suction Hysteresis

指導教授 金 泰 亨



2010年 8月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

土木環境工學科

李 善 龍

工學碩士 學位論文

석션이력을 고려한 불포화토 거동 특성

Behavior Characteristics of Unsaturated Soils
Considering Suction Hysteresis

指導教授 金 泰 亨



2010年 8月

韓國海洋大學校 海事產業大學院

土木環境工學科

李 善 龍

本 論文을 李善龍의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 宋 泳 錫 (印)

委 員 徐 榮 敎 (印)

委 員 金 泰 亨 (印)



2010年 8月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

목 차

목 차	i
LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
ABSTRACT	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구목적 및 내용	2
제 2 장 불포화토 기본이론	4
2.1 불포화토의 기본구조	4
2.2 모관흡수력	8
2.3 함수특성곡선	10
제 3 장 자동함수특성곡선측정장치의 특징	13
3.1 시험장치의 구성	13
3.1.1 압력조절장치	13
3.1.2 물저장소	14
3.1.3 플로우셀	15
3.1.4 공기제거장치	16
3.1.3 측정시스템	17
3.2 측정원리	20
3.3 시험준비	21
3.3.1 시험재료의 특성	21
3.2.2 시료 및 세라믹디스크 포화	22
3.2.3 시험장치 포화	23

제 4장 시험 결과 및 분석	25
4.1 주문진표준사의 함수특성곡선 평가	25
4.1.1 SWRC 프로그램을 통한 시험결과	25
4.1.2 모델방정식을 이용한 계수추정	30
4.1.3 시험결과 및 모델방정식을 이용한 함수특성곡선	36
4.1.4 결과 비교	40
4.2 주문진표준사의 응력상태 평가	44
4.2.1 불포화토 유효응력 이론	44
4.2.2 흡입응력특성곡선	48
4.3 불포화 무한사면 안정해석	54
4.3.1 불포화 무한사면 이론	54
4.3.2 불포화 무한사면 해석	58
제 5장 결 론	67
참고문헌	69
감사의글	73



LIST OF TABLES

Table 3.1 Properties of Joomunjin sand	22
Table 4.1 Test results of drying process	26
Table 4.2 Test results of wetting process	27
Table 4.3 Parameters for Brooks and Corey method	37
Table 4.4 Parameters for van Genuchten method	38
Table 4.5 Parameters for Fredlund and Xing method	39
Table 4.6 Coefficient of determination analysis	43
Table 4.7 Comparison for SSCC	54
Table 4.8 Conditions of infinite slope	59



LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Relationship for volume-mass of unsaturated soil	5
Fig. 2.2 General soil water characteristic curve	12
Fig. 2.3 Soil water characteristic curve for soil type	12
Fig. 3.1 Automated soil water characteristic curve measurement apparatus	13
Fig. 3.2 Pressure panel	14
Fig. 3.3 Water reservoir	15
Fig. 3.4 Flowcell	16
Fig. 3.5 Air bubble trap	17
Fig. 3.6 Measurement apparatus	18
Fig. 3.7 SWRC program	19
Fig. 3.8 Diagram of test apparatus	21
Fig. 3.9 Particle size distribution curve of Joomunjin sand	22
Fig. 3.10 Saturation of soil and HAE disk	23
Fig. 3.11 Saturation of test apparatus	24
Fig. 4.1 Mass of water outflow for matric suction	25
Fig. 4.2 Test result of Joomunjin sand	29
Fig. 4.3 Estimation of Brooks and Corey parameters	31
Fig. 4.4 Estimation of van Genuchten parameters	33
Fig. 4.5 Estimation of Fredlund and Xing parameters	36
Fig. 4.6 SWCC by Brooks and Corey method	37
Fig. 4.7 SWCC by van Genuchten method	38
Fig. 4.8 SWCC by Fredlund and Xing method	39
Fig. 4.9 Comparison for SWCC (drying process)	41
Fig. 4.10 Comparison for SWCC (wetting process)	42
Fig. 4.11 Expanded Mohr-Coulomb failure envelope curve	46
Fig. 4.12 Effect for suction stress according to shear strength	48
Fig. 4.13 Relationship between SWCC and SSCC	50
Fig. 4.14 SSCC of Joomunjin sand	53
Fig. 4.15 General infinite slope	55

Fig. 4.16 Variation of internal friction with weathered zone depth	57
Fig. 4.17 Infinite slope formed by Joomunjin sand	59
Fig. 4.18 SWCC of Joomunjin sand with ground water level	60
Fig. 4.19 Evaluation of factor of safety (drying process)	61
Fig. 4.20 Evaluation of factor of safety (wetting process)	62
Fig. 4.21 SSCC of Joomunjin sand with ground water level	63
Fig. 4.22 Variation of factor of safety with suction stress	65



Behavior Characteristic of Unsaturated Soils Considering Suction Hysteresis

by
Lee, Seon Yong

*Major in Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Maritime Industrial Studies
Korea Maritime University*

ABSTRACT



Many geotechnical problems are occurred when the ground is to a unsaturated condition. This unsaturated soil is more difficult and complicated than a saturated soil in understanding ground behavior characteristics. Therefore, various studies and researches are required about unsaturated soil. In order to do that, it is necessary to obtain the soil water characteristic curve which shows nonlinear relationship between matric suction and volumetric water contents. In this study, an automated soil water retention curve measurement apparatus was introduced and used to investigate an accurate and expeditious soil water characteristic curve. Joomunjin sand with 75% relative density was used and the test was performed both drying and wetting processes to get a more accurated soil water characteristic curve. The test results showed different phenomena between soil water

characteristic curve of a drying process and soil water characteristic curve of a wetting process.

Stress state of unsaturated soil is represented by suction stress characteristic curve which is closely related with soil water characteristic curve. Therefore, without accurate information about soil water characteristic curve, it is difficult to understand the strength of unsaturated ground. In this study, an accurate suction stress characteristic curve was induced through the soil water characteristic curve parameter. In addition, unsaturated infinite slope consisted of Joomunjin sand was modeled to investigate on the effect of suction stress on the strength of unsaturated ground.



제 1 장 서 론

1.1 연구의 필요성

일반적으로 지반은 지하수위 위치 및 강우침투 등에 따라 포화토, 불포화토 및 건조토로 구분되어지지만 일반적으로 포화토 및 건조토를 대상으로 한 지반 구조물의 설계가 진행되어 왔다. 그 이유는 지반설계시 자연지반을 포화상태로 간주하면 비교적 해석이 간단할 뿐만 아니라 안전 측 설계가 이루어지고 있기 때문이다. 하지만 최근 들어 지반공학 연구 분야에 있어 불포화토에 대한 관심이 급증하고 있다. 고전적인 포화토의 개념과 원리로는 실제 지반에서 발생하는 현상과 거동을 합리적으로 해석 및 예측하기 어렵고 이로 인하여 많은 공학적 문제점이 발생되었기 때문이다.

흙에 있어서 흙입자를 제외한 물과 공기가 차지하는 체적을 간극이라 하고, 이 간극이 물로 채워져 있는 경우를 포화토, 일부만 물로 채워져 있는 경우를 불포화토로 정의한다. 불포화토의 간극에는 물과 공기의 압력 차이에 의한 표면장력과 물 분자를 결합하는 표면력이 발생하게 되고, 이는 각각 모세관현상과 흡착현상의 원인이 된다. 따라서 불포화영역에서는 부의 간극수압이 발생되고 이로 인해 유효응력과 물의 흐름을 변화시키게 된다.

불포화토의 관한 연구는 1900년도 초부터 모관흡수력(matric suction) 개념의 도입으로부터 시작되었다(Buckingham, 1907; Edlefsen and Anderson, 1943; Childs and Collis-George, 1948; Bolt and Miller, 1958). 모관흡수력은 간극 속에 있는 물과 공기의 압력 차로 정의되며 표면장력을 일으켜 모관현상을 발생시키는 대표적인 요인이다.

현재까지의 연구동향을 살펴보면, 불포화토는 부간극수압의 영향으로 겉보기 점착력뿐만 아니라 간극 속에 공기 함입으로 인한 투수성 저하 등과 같은 포화토와 다른 거동특성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Jennings and Burland,

1962; Fredlund and Morgenstern, 1977; Fredlund et al., 1978; Lu and Likos, 2006; Lu and Tan, 2005, 2007; 이승래 등, 2001; 김찬기, 2003; 성상규와 이인모, 2003; 유남동 등, 2004; 이혜지, 2004; 김태형, 2008). 이러한 불포화토는 포화토에 비해 이해하기 어렵고 복잡하기 때문에 불포화토에 대한 다양한 연구와 이해가 지속적으로 필요하다.

불포화토의 연구는 주로 불포화토에 대한 이론적인 해석, 불포화토의 물성을 측정하는 실험적인 방법, 불포화토의 거동예측 등이 이루어지고 있다. 이때 함수특성곡선은 모관흡수력과 포화도 혹은 체적함수비 사이의 관계를 나타내어주는 불포화토 고유의 물성으로서 불포화토의 거동 특성 및 흐름 특성을 이해하고 해석하는데 있어서 필수적인 요소로 활용된다. 함수특성곡선은 석션이력력으로 인해 건조곡선과 습윤곡선 2개의 곡선이 존재하며 따라서 이를 반영한 정확한 함수특성곡선 측정은 불포화토 연구에 있어 매우 중요한 시작이라 할 수 있다(신길호와 박성완, 2006; 기완서와 김선락, 2008).

1.2 연구목적 및 내용



본 연구에서는 새롭게 개발된 자동함수특성곡선측정장치를 소개하고 이를 이용하여 정확한 불포화토의 특성을 파악하는데 초점을 두었다. 본 연구에서는 한국지질자원연구원에 구축된 불포화토 시험장치를 활용하였다(송영석 등, 2010). 자동함수특성곡선측정장치는 측정원리가 비교적 간단하고 연속적인 측정이 가능한 자동화된 시험기로서 특히 흙을 탈수시키는 건조과정과 다시 흙을 포화시키는 습윤과정에 따른 시험이 가능하고 실시간 함수량 그림을 통해 시험자에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화토의 특성을 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 주문진표준사를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 함수특성시험을 실시하고 Books and Corey 방법(1964), van Genuchten 방법(1980), Fredlund and Xing 방법(1994)을 이용하여 건조

및 습윤과정에 따른 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)을 유도하고자 한다.

또한 본 논문에서는 불포화토의 응력상태를 나타내는 건조 및 습윤과정에 따른 흡입응력특성곡선을 유도하고 포화정도에 따른 흡입응력의 변화특성을 살펴 보았다. 흡입응력특성곡선은 Lu and Likos(2004, 2006)가 제안한 것으로 함수 특성곡선의 면적(모관흡수력과 유효포화도의 곱)은 흙이 가지는 에너지를 나타내며, 이 에너지는 불포화토의 흡입응력으로 작용한다고 가정하였다. 이러한 흡입응력과 모관흡수력 또는 흡입응력과 유효포화도의 관계를 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristic Curve, SSCC)이라 정의하였다.

마지막으로, 시험시료와 동일하게 상대밀도 75%의 주문진표준사로 이루어진 불포화무한사면을 가정하여 건조 및 습윤과정에 대한 사면의 안정성을 평가하고 흡입응력이 지반강도와 사면의 안정성에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 Lu and Likos(2004, 2006)가 흡입응력곡선을 토대로 Terzaghi(1943)와 Bishop(1959)의 유효응력이론을 확장한 새로운 불포화토 유효응력이론을 이용하였다.



제 2 장 불포화토 기본이론

2.1 불포화토의 기본구조

흙은 구성하고 있는 물질은 흙입자(soil particle), 물(water), 공기(air)로서 유기질토의 경우 유기물질이 섞여 있는 경우도 있다. 흙의 주성분은 흙입자 이고 흙입자 사이에는 간극이 반드시 존재하며 간극 속에는 물 또는 공기로 차 있다. 흙입자는 암석의 풍화산물로서 고체이고 간극 속의 물은 액체이며 공기는 기체이다. 따라서 흙은 고체, 액체 및 기체의 3상이 모두 포함되어 있으므로 역학적 거동이 복잡하게 나타난다. 흙의 상태는 흙입자 사이의 간극에 물과 공기가 차지하는 비율에 따라 여러 가지 상태로 나타난다.

- (a) 흙입자가 있고 간극에 물과 공기가 있는 습윤상태
- (b) 흙입자와 공기로만 채워져 있는 건조상태
- (c) 흙입자 사이 간극이 물로 채워져 있는 포화상태

Fig. 2.1은 자연상태에서의 흙의 구성요소를 개략적으로 도시한 것이다. 흙의 구성요소에 대한 개략도는 입자, 물, 공기 등 3가지 성분이 불규칙하게 섞여 있는 자연상태 흙의 구성 상태를 이해하기 위해 기둥모양의 그림으로 표시한다. 기호의 큰 문자는 부피(V : Volume)와 무게(W : Weight)를 뜻하고, 하첨자는 흙입자(s : solid), 물(w : water), 공기(a : air)를 뜻하므로 각 기호의 의미는 다음과 같다.

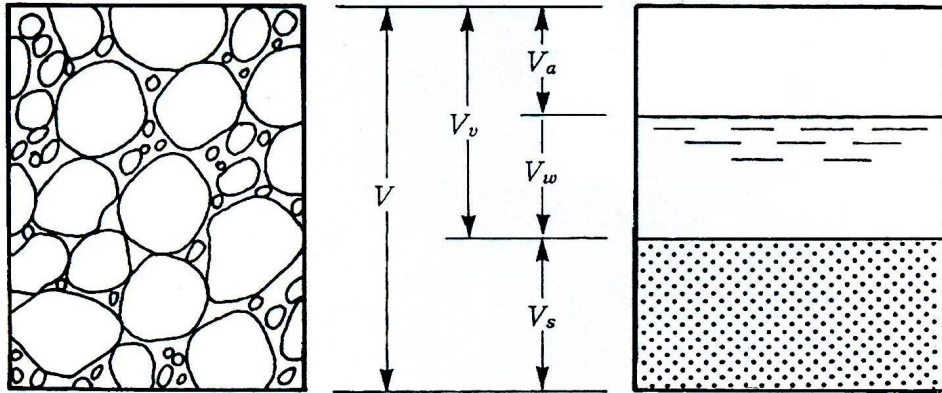


Fig. 2.1 Relationship for volume-mass of unsaturated soil

여기서,

V = 흙 전체의 부피(total volume of soil)

V_s = 흙입자의 부피(volume of solid)

V_w = 물의 부피(volume of water)

V_a = 공기의 부피(volume of air)

V_v = 간극의 부피(volume of void)

W = 흙 전체의 무게(total weight of soil)

W_s = 흙입자의 무게(weight of solid)

W_w = 물의 무게(weight of water)

W_a = 공기의 무게(weight of gas)

공학적 관점에서 흙입자, 물 및 공기의 체적-질량의 관계는 흙의 기본적 성질로서 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

간극률(n)은 전체 체적 V 에 대한 간극 체적 V_v 의 비로 정의된다.

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 (\%) \quad (2.1)$$

그리고 물에 대한 간극률(n)을 표현할 수 있는데, 이는 일반적으로 체적함수비(θ)로 알려져 있다.

간극비(e)는 흙입자 체적 V_s 에 대한 간극 체적 V_v 의 비로 정의된다.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.2)$$

물이 간극 체적 중 차지하고 있는 비율은 포화도(S)로 표현된다.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 (\%) \quad (2.3)$$

포화도는 $0 \leq S \leq 100 \%$ 의 범위에 있으며 포화도의 값을 보고 흙이 어떠한 상태에 있음을 판단할 수 있다. 건조상태의 경우 물이 존재하지 않고 오직 흙입자와 공기만으로 이루어지기 때문에 포화도는 0이 된다. 반면 포화상태의 경우 공기 없이 흙입자와 물로 이루어지기 때문에 포화도는 100%가 된다. 불포화도는 이 중간상태에 위치하며 공기 상이 연속적인가 닫힌 상태인가에 따라 의미가 달라진다. 연속적인 공기가 있는 불포화도는 대략 80% 보다 낮은 포화도를 가지는 반면 닫힌 공기방울이 존재하는 경우에는 포화도가 90%보다 높다.

함수비(w)는 흙 속에 포함되어 있는 물의 무게를 흙입자의 무게로 나눈 비를 백분율(%)로 표시한 것이다.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%) \quad (2.4)$$

일반적으로 함수비는 중량함수비로 알려져 있지만 불포화토 이론에서는 흙의 3상체계를 고려한 체적함수비가 쓰인다.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2.5)$$

이는 다시 포화도와 간극비의 관계로 표현할 수 있다.

$$\theta = \frac{S \cdot e}{1 + e} \quad (2.6)$$

체적함수비와 중량함수비는 흙에서 체적변형이 발생하지 않는다고 가정할 때 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\theta = \frac{w \cdot G_s}{1 + e} \quad (2.7)$$

또한 체적함수비를 포화체적함수비(θ_s)와 잔류체적함수비(θ_r)의 차이로 정규화하여 사용하기도 하는데 이를 유효체적함수비(θ_e)라 한다.

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.8)$$

포화도(S)와 유효체적함수비(θ_e)와의 관계를 살펴볼 때 잔류체적함수비(θ_r)가 0이라고 가정한다면, 유효체적함수비는 포화도와 같아진다.

$$\theta_e = \frac{\theta_w}{\theta_s} = \frac{V_w/V}{V_v/V} = \frac{V_w}{V_v} = S \quad (2.9)$$

그리고 유효포화도(effective degree of saturation, S_e)는 다음과 같이 정의된다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2.10)$$



여기서,

S_e = 유효포화도

S_r = 잔류포화도

2.2 모관흡수력

물은 물리화학적 작용에 의하여 흙 속 간극 내에 유지된다. 이처럼 흙이 물을 보유하게 되는 이유는 간극 내 물과 공기의 접촉면에서 발생하는 모관력(capillary force)과 물분자를 흡착하는 흙입자의 표면력(surface force) 때문이다. 특히 점토는 표면력이 우세하다.

이렇게 흙이 보유하는 물을 에너지로 표현할 수 있다. 대기압보다 낮은 압력에서 흙 내부에서 물이 평형상태에 있거나 흙이 물을 빨아들이기 위하여 힘을 발휘하는 상태를 자유에너지 상태(free energy state)라 정의한다. 그리고 이러한 힘을 흙의 흡수력이라 한다(Edlefsen and Anderson, 1943). 자유에너지는 흙 속에 존재하는 물의 부분증기압(partial vapor pressure)에 의하여 측정된다(Richards, 1965). 흙의 흡수력과 간극수증기의 부분압력과 열역학적 관계는 다음과 같다.

$$\Psi = - \frac{RT}{v_{wo}w_v} \ln \left(\frac{\overline{u_v}}{u_{vO}} \right) \quad (2.11)$$

여기서,

Ψ = 흙의 흡수력 또는 전 흡수력

R =절대기체상수

T =절대온도

v_{wo} = 물의 비체적 또는 물 밀도의 역수 $[1/\rho_w]$

w_v = 수증기의 분자질량

$\overline{u_v}$ = 간극수증기의 부분압력

u_{vO} = 순수한 물의 평평한 표면상에서 수증기의 포화압력



흙의 흡수력은 전흡수력(total suction)이라 불리며, 이는 모관흡수력(matric suction)과 삼투흡수력(osmotic suction)으로 구분된다. 전 흡수력은 흙내 물의 자유에너지에 상응하고 모관흡수력과 삼투흡수력은 이러한 자유에너지의 요소들이다. 모관흡수력은 물 표면에서 공기압과 수압의 차이로 정의되고 삼투흡수력은 간극수에 용해된 염분 등으로 인해 나타난다. 전흡수력을 표현하면 다음

식 2.12와 같다.

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o = (u_a - u_w) + \Psi_o \quad (2.12)$$

여기서,

Ψ_t = 전흡수력

$\Psi_m = u_a - u_w$ = 모관흡수력

Ψ_o = 삼투흡수력

모관흡수력은 간극공기압(u_a)과 간극수압(u_w)의 차($u_a - u_w$)로 정의되며 간극 공기압이 대기압과 같다면 불포화토의 부간극수압으로 작용하게 된다. 이런 모관흡수력은 외부환경의 변화에 의해 변하며 흙의 평형상태에도 영향을 미친다. 물론 토양용액의 변화로 인한 삼투흡수력의 변화 또한 흙의 역학적 거동에 영향을 미치지만 일반적인 지반공학적 문제에서 외부환경의 변화에 의한 전흡수력의 변화는 모두 모관흡수력의 변화와 같다고 할 수 있기 때문에 모관흡수력은 전흡수력의 주요성분으로 고려되어 불포화토의 모관현상을 발생시키는 대표적인 성질이 된다.

2.3 함수특성곡선

불포화토의 경우에는 모관흡수력이 지반의 거동특성을 예측하는데 있어 매우 중요한 설계변수로 작용한다. 따라서 불포화토와 관련된 흐름특성, 변형특성 및 강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 이들 거동특성에 대한 모관흡수력의 영향을 반드시 고려해야 한다.

함수특성곡선은 지반의 고유특성으로 지반의 불포화상태 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이라 할 수 있다. 함수특성곡선은 흙속에 존재하는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의되고, 물의 양은 중량함수비(gravimetric water content), 체적함수비(volumetric water contents) 또는 포화도로 나타낼 수 있다.

전형적인 함수특성곡선의 모양은 Fig. 2.2와 같이 S자 형태를 보인다. 포화된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기함입저항치(air-entry value)를 초과하지 않으면 간극으로부터 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기함입저항치는 간극 내부로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다. 그리고 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 유출되지 않는 함수비를 잔류함수비(residual water content, θ_r)라 한다. 이 함수비에서 보유하고 있는 물은 오로지 열에 의해서만 제거될 수 있다. Fig. 2.2에 표시된 θ_s 는 포화체적함수비로서 흙의 간극 당 보유할 수 있는 최대체적함수비를 의미한다. 하지만 이러한 포화체적함수비는 흙의 간극률과 일치하지 않는다. 그 이유는 현장지반에서의 포화체적함수비는 일반적으로 갇힌 상태거나 간극 속에 용해된 공기를 포함하기 때문에 간극률보다 약 5~10% 정도 더 낮게 나타난다(이혜지, 2004).

비교적 낮은 모관흡수력(0~1기압)에서 보유된 함수량은 주로 모세관 효과와 간극크기분포에 따라 좌우되므로 흙 구조의 영향을 크게 받는다. 하지만 더 높은 모관흡수력 범위에서의 보유된 수분은 흡착작용에 의해 점차적으로 더 크게 좌우되므로 흙의 비표면적과 흡입자 표면의 이중확산층이 더 큰 영향을 미친다. Fig. 2.3에서는 흙 종류에 따른 함수특성곡선의 형태를 나타냈으며 흙의 소성도가 증가할수록 포화체적함수비와 공기함입저항치가 커지는 것을 확인할 수 있다.

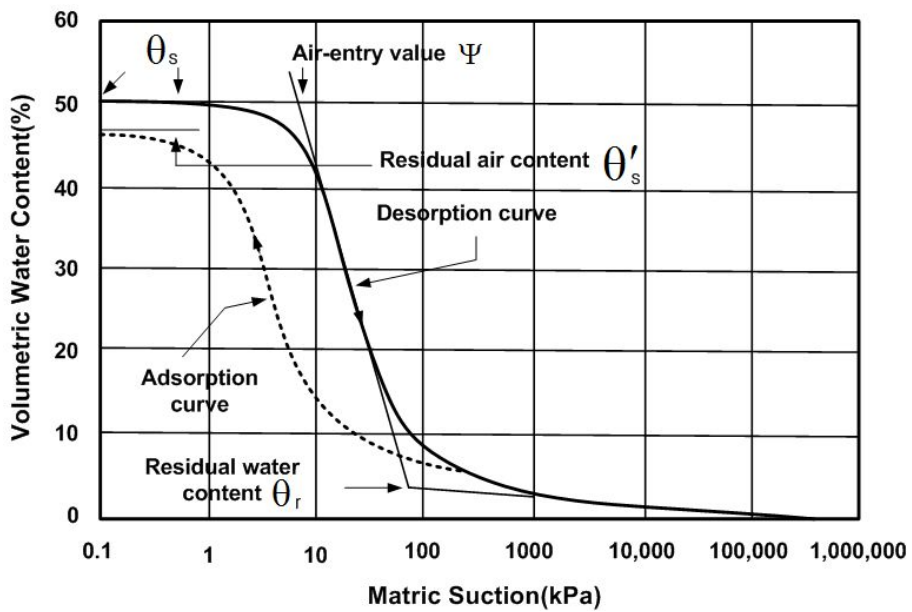


Fig. 2.2 General soil water characteristic curve

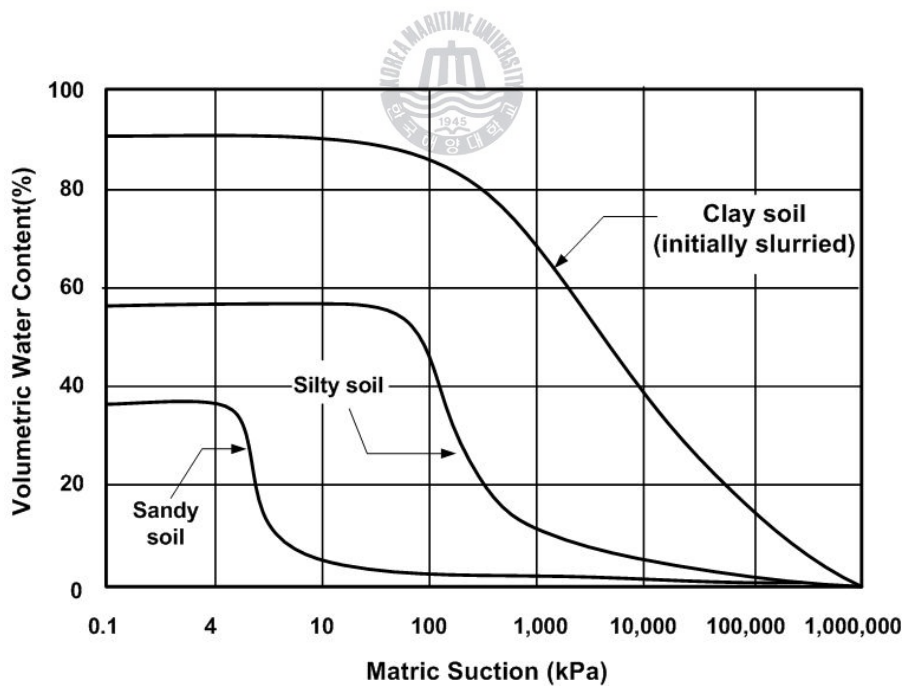


Fig. 2.3 Soil water characteristic curve for soil type

제 3 장 자동함수특성곡선측정장치의 특징

3.1 시험장치의 구성

Fig. 3.1은 자동함수특성곡선측정장치의 전반적인 모습을 나타내었다. 시험장치는 크게 압력조절장치(pressure panel), 물저장소(water reservoir), 시료포화장치(saturation system), 플로우셀(flowcell), 공기제거장치(air bubble trap), 측정시스템(measurement system)으로 이루어져 있다. 시험장치는 일정 공기함입저항치(air-entry value)를 갖는 HAE디스크(High Air Entry disk)를 설치한 후 그 위에 시료를 올려놓고 셀 내부에 공기압을 가하여 흡시료에서 추출되는 물의 양을 측정하고, 그에 따라 변화하는 체적함수비를 측정하는 방법으로서 시험장치에 대한 세부적인 특징은 다음과 같다.



Fig. 3.1 Automated soil water characteristic curve measurement apparatus

3.1.1 압력조절장치(pressure panel)

압력패널은 컴프레서에서 공급된 압력을 조절하며 조절된 압력을 플로우셀에

전달한다. Fig. 3.2a에 보이는 오른쪽 튜브는 컴프레셔와 연결되어 있으며 왼쪽 튜브를 통해 계획된 공기압을 플로우셀 안에 설치된 시료에 전달한다. Fig. 3.2b에서 보이는 왼쪽의 레귤레이터로 비교적 작은 0~15kPa까지의 압력을 조절하며, 오른쪽 레귤레이터는 15~300kPa의 큰 압력을 조절한다. 이 압력은 흡입자에 부착되어 있는 수분추출에 요구되는 압력으로서 모관흡수력 즉 불포화토의 부간극수압으로 작용하게 된다. 본 연구에서는 1bar의 공기함입저항치를 갖는 HAE디스크를 사용하였기 때문에 플로우셀 내부로 가해지는 압력은 최대 100kPa이하로 제한하여 시험하였다.

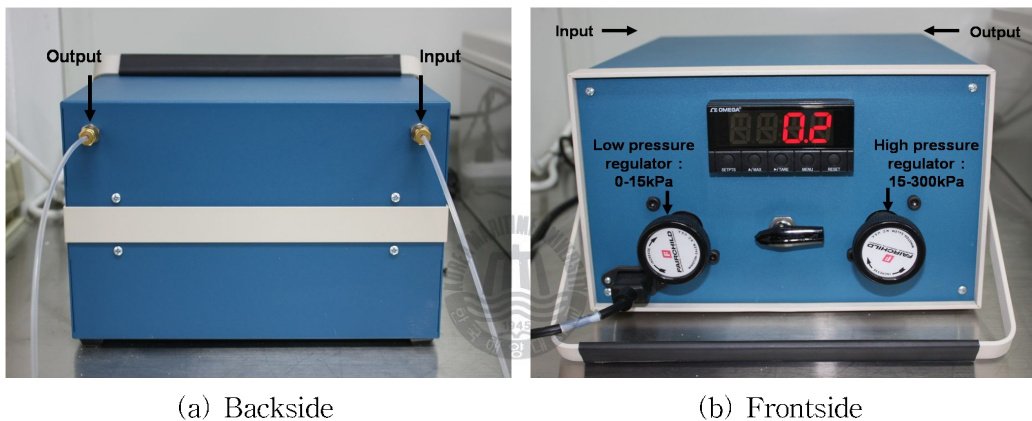
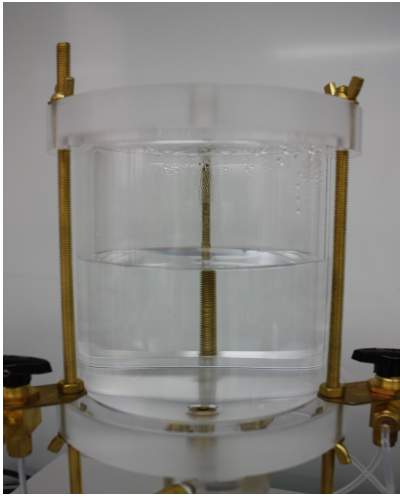


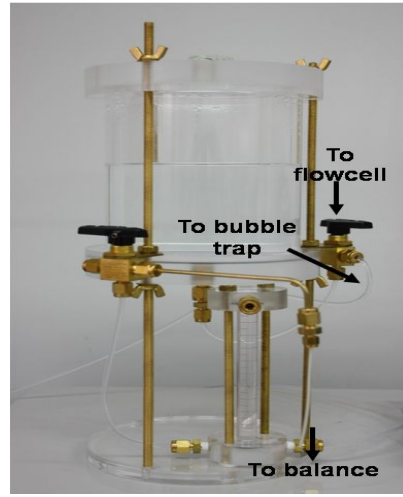
Fig. 3.2 Pressure panel

3.1.2 물저장소(water reservoir)

물저장소는 측정장치와 플로우셀 및 공기제거장치와 연결된다. Fig. 3.3b와 같이 밸브를 열고 닫아 각 연결장치 마다 물을 공급할 수 있기 때문에 장치 별 연결튜브 및 공기제거장치, 공기방울제어시스템(air bubble flushing system)과 HAE디스크 사이를 포화시켜 시험과정 중 발생할 수 있는 공기를 제거하는데 목적이 있다. 물 저장소는 정제된 증류수로 채워져 있고 다른 시험장치보다 높게 위치시켜 수두차를 이용하여 각 장치 및 튜브를 포화시킬 수 있다.



(a) Injection of distilled water



(b) Connection of water reservoir

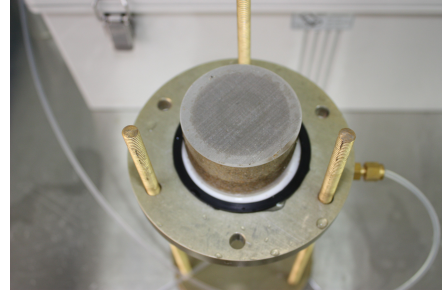
Fig. 3.3 Water reservoir

3.1.3 플로우셀(flowcell)

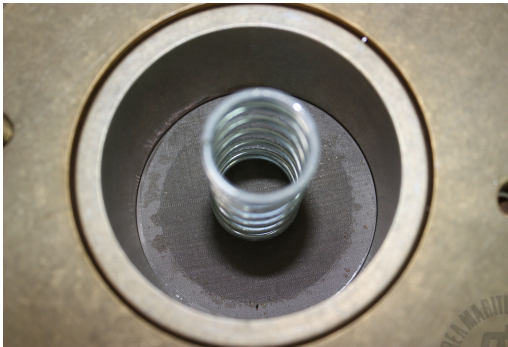
Fig. 3.4d와 같이 플로우셀 윗부분에는 조절된 공기압이 전달되어지며 플로우셀의 공기방울제어시스템(Fig. 3.4a)은 물 저장소 및 공기제거장치와 연결된다. 공기방울제어시스템 위에는 포화된 1bar의 HAE디스크를 위치시키고 오링으로 고정함으로서 일정한 압력 하에 발생 가능한 수분유출 및 공기유입을 방지하였다. Fig. 3.4b와 같이 HAE디스크 위에는 흡시료를 설치하고 그 위에 철망과 스프링을 위치시켜(Fig. 3.4c) 시료를 고정시킴으로서 시험 중 발생가능한 흡시료의 이탈 현상을 방지하였다. 특히 HAE디스크와 공기방울제어시스템 사이에는 1/16인치의 가느다란 튜브와 튜브를 둘러싼 원형의 공간이 존재하는데 이 공간은 간극수압의 측정경로로서 측정시스템들과 연결된다. 시료에 존재하는 간극수와 공기방울제어시스템에 존재하는 물은 포화된 HAE디스크의 간극을 통하여 서로 연결되어 있고 상하로 유동이 가능하다. 하지만 흡시료에 존재하는 공기는 HAE디스크를 통과할 수 없기 때문에 간극공기압과 간극수압의 경로를 각각 분리하여 제어 및 측정할 수 있다.



(a) Air bubble flushing system



(b) HAE disk and saturated soil



(c) Fixing the soil



(d) Connection of flowcell

Fig. 3.4 Flowcell

3.1.4 공기제거장치(air bubble trap)

Fig. 3.5와 같이 공기제거장치에는 총 4개의 연결로가 있으며 튜브 및 배출구로 이루어져 있다. 튜브는 각각 물저장소, 플로우셀, 저울로 연결되며 배출구를 통해 공기제거장치를 포화시킬 수 있다. 시험과정 중 공기압 증가로 인하여 흡시료의 간극수는 HAE디스크를 통해 빠져나오게 되며 빠져나온 물은 저울을 통해 측정된다. 여기서, 흡시료 내의 공기압은 물의 압력 보다는 항상 커서 공기는 물속으로 확산될 수 있으며 이렇게 확산된 공기는 흡시료 내의 공기가 가압될 때 HAE디스크 통하여 물과 함께 빠져 나오게 된다. 하지만 HAE디스크

아래 공간에 존재하는 물의 압력은 시료내의 공기압력에 비해 작으므로 물속에 확산되어 있던 공기가 이탈되어 HAE디스크 아래에 공기방울이 생기게 되며 이는 시험과정상의 오차로 작용할 수 있다. 이러한 오차는 공기제거장치를 이용해 공기와 물을 분리시킴으로서 제거할 수 있다. 공기제거장치에는 부피별 눈금이 매겨져 있어 시험 중 발생가능한 공기량을 정량화 할 수 있으며 이러한 공기방울의 체적은 시료의 체적함수비 변화량에 포함되어 있으므로 저울에서 측정한 양으로부터 감해져야만 한다.

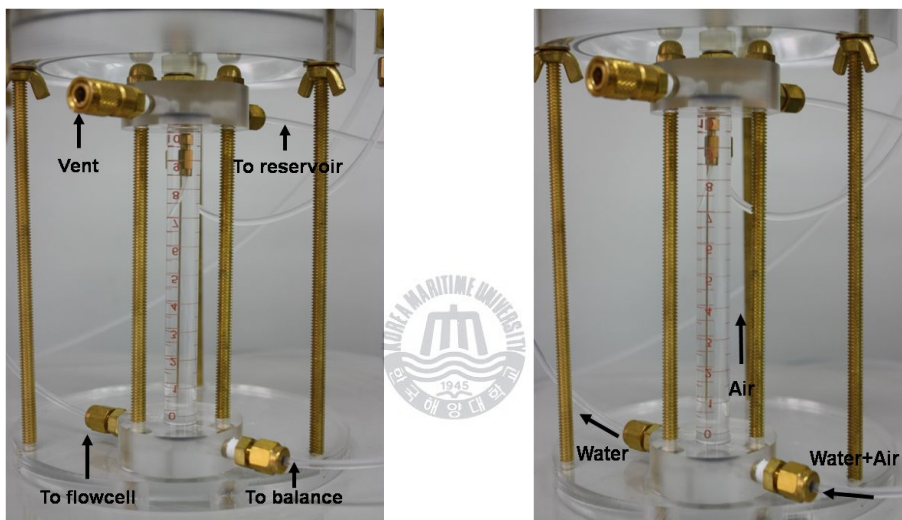
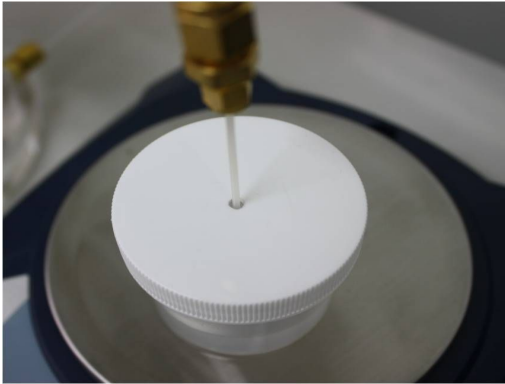


Fig. 3.5 Air bubble trap

3.1.5 측정시스템(measurement system)

측정시스템은 저울과 SWRC(Soil Water Retention Curve) 프로그램으로 이루어져 있다. 저울위에는 흡수력 단계에 따라 변화되는 물의 양을 측정하기 위해 작은 캡을 올려놓으며 일정량의 증류수를 담아 놓아 Fig. 3.6a와 같이 저울로 전달되는 튜브를 잠기게 해야 한다. 그 이유는 튜브를 증류수와 연결시킴으로서 대기중으로 흡입될 수 있는 공기를 미연에 방지하고 튜브에서 배출되어 떨어지는 물의 충격으로 인해 실시간 측정되는 저울데이터의 오차를 막기 위함

이다.



(b) Small reservoir cap



(c) balance

Fig. 3.6 Measurement apparatus

저울에서 측정된 데이터는 컴퓨터로 전달되어지며 Fig. 3.7과 같은 SWRC 프로그램을 통해 확인할 수 있다. SWRC 프로그램의 실시간 그림을 통해 흙의 함수거동을 확인할 수 있으며 데이터 저장간격을 조절 할 수 있어 시험을 보다 신속하고 정밀하게 측정 할 수 있다. 다음은 프로그램에 대한 세부적인 특징을 나타내었다.

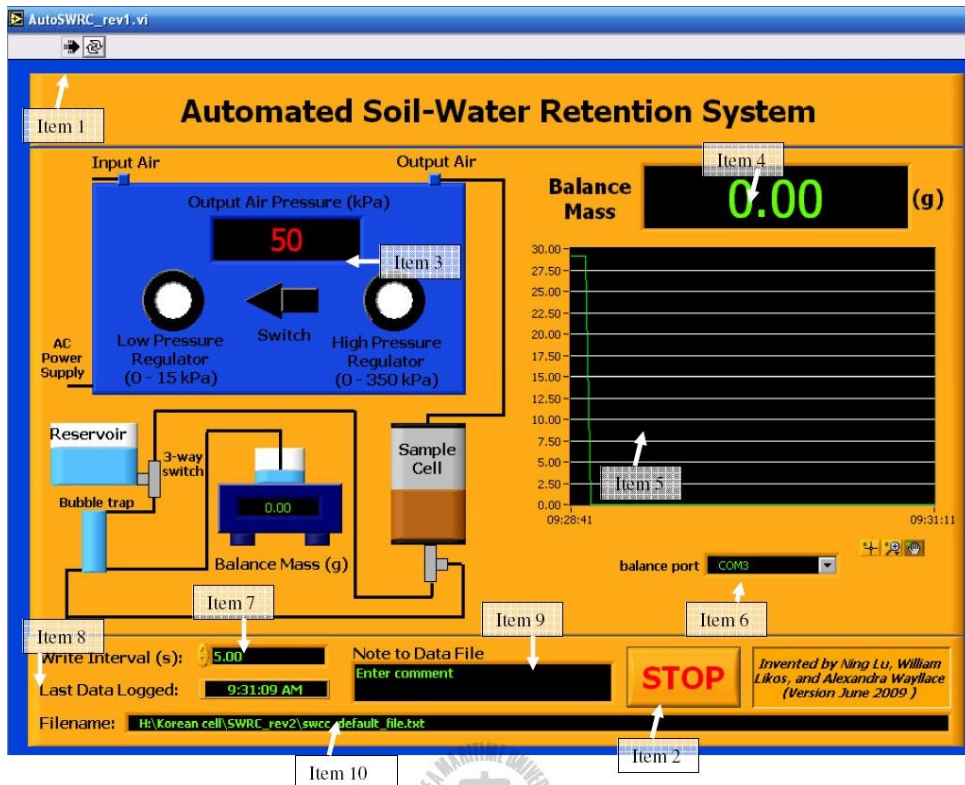


Fig. 3.7 SWRC program

Item 1: 시작 버튼을 의미한다.

Item 2: 종료버튼을 의미한다.

Item 3: 현재 시료에 주입되고 있는 공기압력을 의미한다.

Item 4: 현재 저울의 측정값을 의미하며 프로그램에서 저울 측정값을 실시간으로 읽어 드린다.

Item 5: 저울에서 측정되어진 값을 좌표를 형성해 실시간으로 표현한다.

Item 6: 저울의 연결 포트를 의미한다.

Item 7: 저장간격을 의미한다.

Item 8: 마지막으로 측정값이 저장된 시간을 의미한다.

Item 9: 사용자 노트로서, 측정값에 대한 추가적인 코멘트를 적을 수 있다.

Item 10: 측정값을 어느 위치에 어떤 이름으로 저장했는지 알 수 있다.

3.2 측정원리

자동함수특성곡선측정장치는 시료에 공기압력을 가해 포화시료를 불포화상태로 만드는 건조과정과 불포화상태의 시료를 포화상태로 만드는 습윤과정에 따른 함수변화특성을 파악할 수 있는 시험기로서 장치는 크게 압력조절장치-시료-HAE디스크-공기제거장치-저울-프로그램 순으로 연결된다.

우선 Fig. 3.8과 같이 컴프레서에서 발생된 공기압을 압력조절장치에서 조절하고 계획된 공기압을 포화된 흙시료에 가한다. 여기서 공기압은 불포화토의 모관흡수력으로 작용하며 시료가 가지는 일정 공기함입저항치를 넘어서게 되면 흡입자에 부착되어 있는 간극수가 배출된다. 이때 간극수는 HAE디스크를 통과하여 저울을 통해 측정되어진다. 저울은 컴퓨터와 연결되어 있기 때문에 측정값은 SWRC 프로그램을 통해 실시간으로 확인 및 저장이 가능하다. 따라서 SWRC 프로그램에 나타난 실시간 그래프를 통해 간극수의 유출입 변화를 확인할 수 있으며 다음 단계의 모관흡수력을 계획할 수 있다. 본 시험기는 모관흡수력을 단계별로 증가시켜 흙시료를 탈수시키는 건조과정에 대한 함수변화특성을 나타낼 수 있으며 반대로 흡수력을 줄여가면서 다시 흙을 포화시키는 습윤

과정의 대한 함수변화특성을 나타낼 수 있다. 이런 일련의 과정은 불포화토의 체적함수비에 따른 모관흡수력 관계를 파악하기 위한 것이며 이는 함수특성곡선을 통해 설명되어진다.

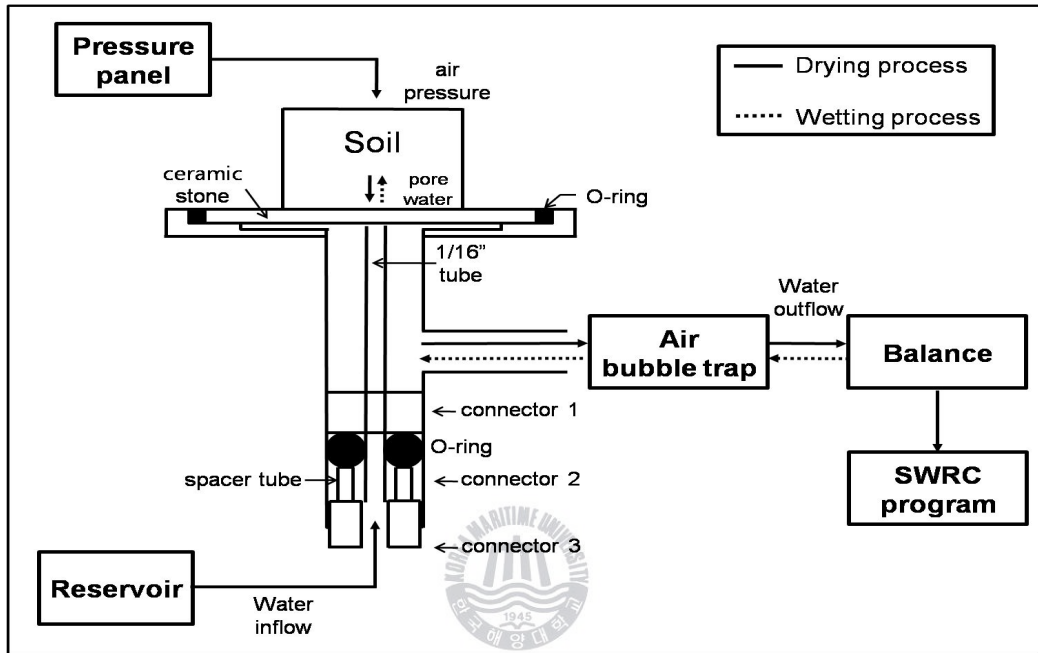


Fig. 3.8 Diagram of test apparatus

3.3 시험준비

3.3.1 시험재료의 특성

본 연구에서의 시험시료로는 주문진표준사가 사용되었다. ASTM D 4253-83 및 ASTM D 4254-83 시험법에 의거하여 최대 및 최소 건조단위중량을 산정하고 상대밀도 75%로 시험을 계획하였다. Fig. 3.9는 주문진표준사의 입도분포곡선을 나타낸 것이며, 주문진표준사의 기본적인 물리적 특성을 Table 3.1에 나타내었다.

Table 3.1 Properties of Joomunjin sand

Description	Symbol	Property
Specific gravity	G_s	2.621
Max. void ratio	e_{\max}	0.919
Min. void ratio	e_{\min}	0.625
Max. dry density	$\gamma_{d\max}$	1.613g/cm ³
Min. dry density	$\gamma_{d\min}$	1.366g/cm ³
Effective particle size	D_{10}	0.42mm
D_{30} particle size	D_{30}	0.51mm
D_{60} particle size	D_{60}	0.63mm
Uniformity coefficient	C_u	1.5
Coefficient of curvature	C_c	1.0

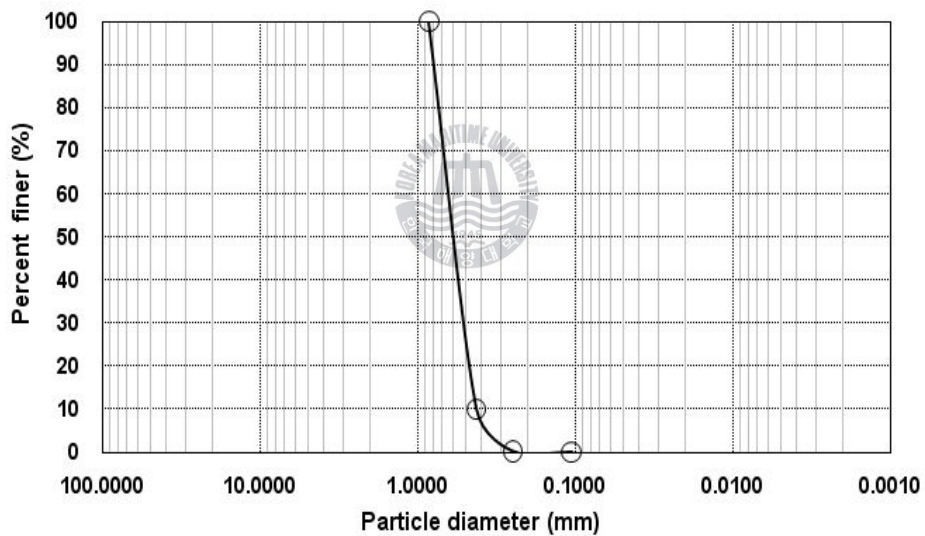
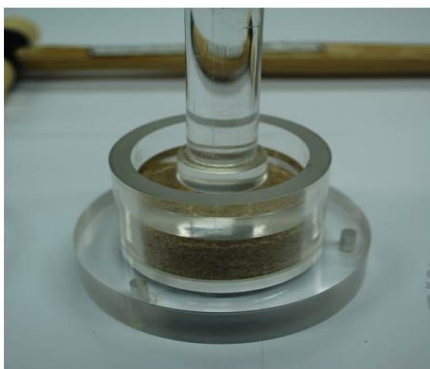


Fig. 3.9 Particle size distribution curve of Joomunjin sand

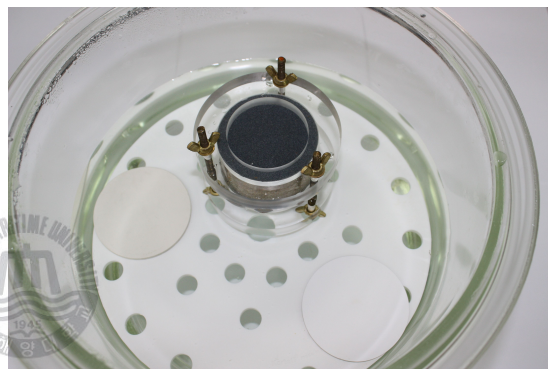
3.3.2 시료 및 HAE디스크 포화

시험시료 및 HAE디스크가 100% 포화되어있지 않으면 측정값의 초기값을 정하는데 많은 어려움이 존재하며 시험결과의 오차를 야기한다. 우선 시료를

성형하기 위한 플라스틱 몰드(직경 $D=5.05\text{cm}$, 높이 $H=3.89\text{cm}$, 부피 $V=78.06\text{cm}^3$)에 Fig. 3.10a와 같이 높이별 3층 다짐을 실시하여 상대밀도 75%에 따른 균일한 시료를 성형하였다. 시료 상·하부에 다공석을 위치시켜 물의 원활한 흐름을 도왔으며 Fig. 3.10b와 같이 정제된 증류수가 담긴 데시케이터에 시료 및 HAE디스크 넣고 진공상태로 약 24시간 이상 방치하였다. 이때 높은 배압을 가함으로써 시료 및 HAE디스크의 포화상태를 보다 확실하게 하였으며 물을 시험시료에 하부로 부터 상부로 흘러보냄으로서 간극 속에 남아있을 수 있는 공기를 제거하였다.



(a) Soil compaction



(b) desiccator

Fig. 3.10 Saturation of soil and HAE disk

3.3.3 시험장치 포화

튜브 속에 공기가 존재하면 작은 모관흡수력 단계에 따라 배출 또는 흡입되는 물의 양의 오차를 가져온다. 따라서 시험 전 물저장소의 수두차를 이용하여 각 장치 및 튜브를 포화시켜야 한다. 특히 HAE디스크 아래 놓여지게 되는 1/16인치의 작은 튜브의 포화여부는 눈으로 확인이 불가능하기 때문에 Fig. 3.11a와 같이 물이 충분히 배출되게 하여 튜브 속 공기를 완벽히 제거해야 한다.



(a) Saturation of tube



(b) Saturation of apparatus

Fig. 3.11 Saturation of test apparatus



제 4 장 시험결과 및 분석

4.1 주문진표준사의 함수특성곡선 평가

4.1.1 SWRC 프로그램을 통한 시험결과

장치를 포화시킨 후 플로우셀에 포화된 시료 및 HAE디스크를 설치하고 SWRC 프로그램을 이용해 불포화 함수특성시험을 실시하였다. 본 연구에서는 포화된 시료에 공기압을 증가시켜 간극수를 탈수시키는 건조과정에 대한 시험을 실시한 후 건조된 시료를 다시 포화시키는 습윤과정에 대한 시험을 실시하였다. Fig. 4.1은 건조 및 습윤과정에 대한 단계별 모관흡수력 및 그에 따라 배출된 물의 양을 나타낸다.

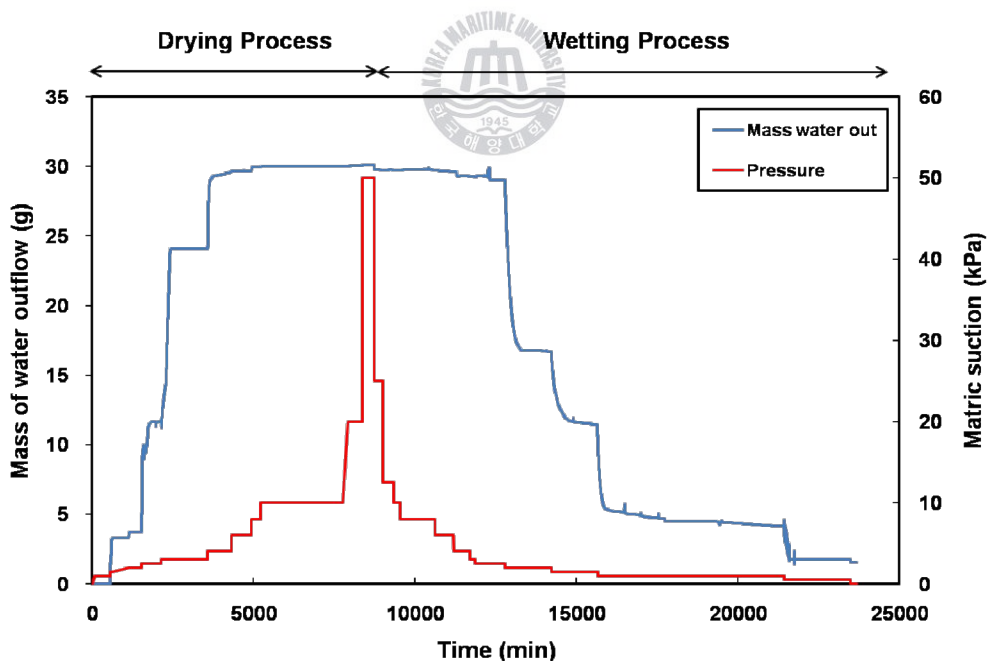


Fig. 4.1 Mass of water outflow for matric suction

시험결과를 통해 알 수 있듯이, 건조과정에 비해 습윤과정의 시험시간이 상대적으로 긴 것을 확인할 수 있었다. 그리고 일정 모관흡수력 단계에서 더 이상 물이 배출 또는 흡입되지 않는 충분한 수렴과정을 거친 후 다음 단계의 모관흡수력을 계획하여 시험 중 발생 가능한 오차를 최소화하였다. 다음 Table 4.1과 Table 4.2는 건조과정과 습윤과정에서 측정된 모관흡수력과 배출 및 흡입된 물의 양을 정리한 것으로서 다음과 같다.

Table 4.1 Test results of drying process

Matric Suction (kPa)	Suction head (m)	Water out (g)	V_w (cc)	θ	S_e
0.1	0.01	0	32.27	0.41	1
0.5	0.05	0	32.27	0.41	1
1.0	0.10	0	32.27	0.41	1
1.5	0.15	3.31	28.96	0.37	0.890
2.0	0.20	3.71	28.56	0.37	0.877
2.5	0.25	11.66	20.61	0.26	0.613
3.0	0.31	24.06	8.21	0.11	0.201
4.0	0.41	29.57	2.70	0.03	0.018
6.0	0.61	29.70	2.57	0.03	0.014
8.0	0.82	29.99	2.28	0.03	0.004
10	1.01	30.02	2.25	0.03	0.003
20	2.02	30.05	2.22	0.03	0.002
50	5.05	30.12	2.15	0.03	0

※ 포화체적함수비(θ_s)=0.41

잔류체적함수비(θ_r)=0.03

Table 4.2 Test results of wetting process

Matric suction (kPa)	Suction head (m)	Water out (g)	V_w (cc)	θ	S_e
50	5.05	30.12	2.15	0.03	0
25	2.55	29.76	2.51	0.03	0.013
12.5	1.27	29.73	2.54	0.03	0.014
10	1.02	29.73	2.54	0.03	0.014
8	0.82	29.72	2.55	0.03	0.014
6	0.61	29.66	2.61	0.03	0.016
4	0.41	29.27	3.00	0.04	0.030
3	0.31	29.28	2.99	0.04	0.030
2.5	0.25	29.00	3.27	0.04	0.039
2	0.20	16.68	15.59	0.20	0.470
1.5	0.15	11.42	20.85	0.27	0.654
1	0.10	4.09	28.18	0.36	0.911
0.5	0.05	1.75	30.52	0.39	0.993
0.1	0.01	1.54	30.73	0.39	1

※ 포화체적함수비(θ_s)=0.39

잔류체적함수비(θ_r)=0.03



여기서,

Matric suction(kPa)=모관흡수력

Suction head(m)=압력수두 (모관흡수력을 수두로 나타냄)

V_w =간극수의 체적($=n \times V$)

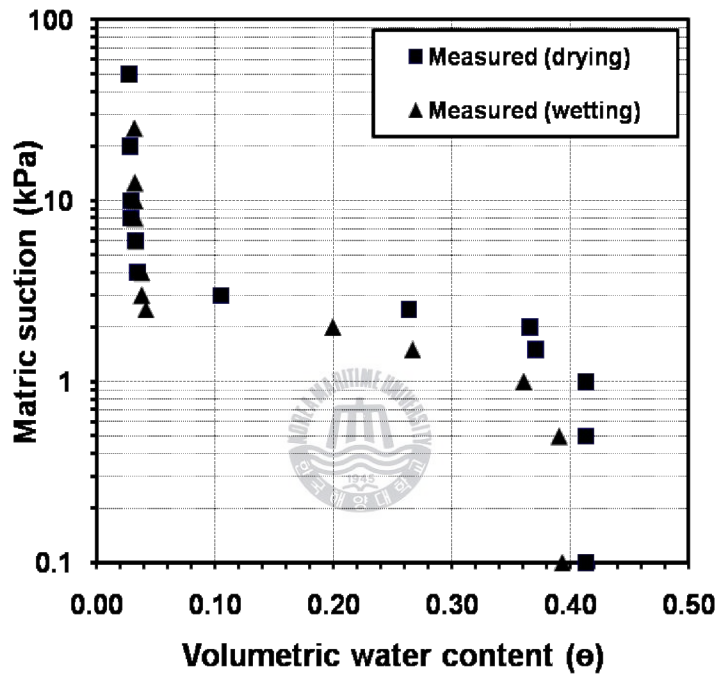
θ =정규체적함수비

θ_s =포화체적함수비

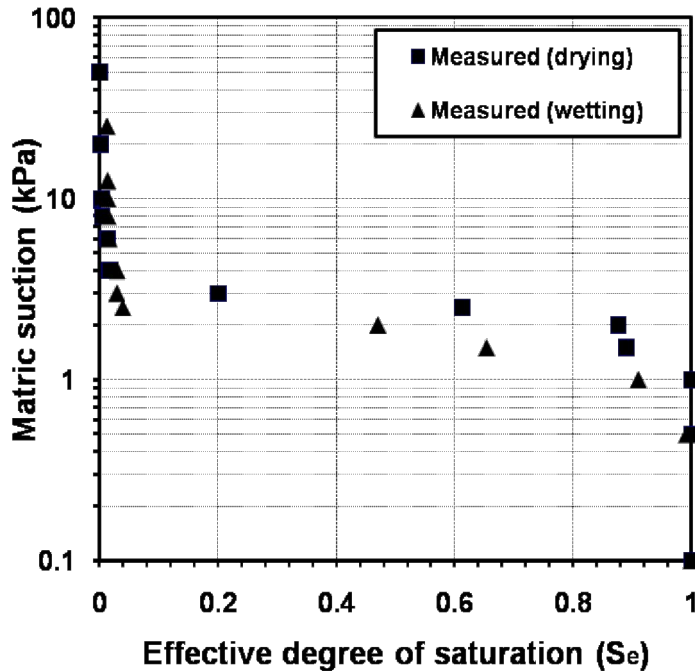
θ_r =잔류체적함수비

S_e =유효포화도 ($=\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$)

흙의 체적함수비는 모관흡수력과 특정한 관계를 갖으며 그 관계를 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)라 한다. Fig. 4.2는 모관흡수력과 체적함수비 관계 및 모관흡수력과 유효포화도 관계를 나타낸 것이다. 이는 자동함수특성곡선측정장치를 이용하여 측정된 상대밀도 75%에 해당하는 주문진표준사의 함수변화특성을 나타낸다.



(a) Relationship of matric suction-volumetric water content



(b) Relationship of matric suction-effective degree of saturation

Fig. 4.2 Test result of Joomunjin sand

그림에서 보는바와 같이, 두 곡선 모두 체적함수비의 감소에 따라 모관흡수력이 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 포화도가 급변하는 구간에서는 작은 모관흡수력의 증가에도 체적함수비의 변화가 크게 나타나고 있다.

포화체적함수비(θ_s)는 포화시 흡시료에 포함된 최대체적함수비를 나타내며, 잔류체적함수비(θ_r)는 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 유출되지 않는 최소체적함수비로서 오로지 열에 의해서만 제거 될 수 있다. 포화 및 잔류체적 함수비는 그림에서 보는 바와 같이 수렴되는 값으로부터 구할 수 있다. 시험결과를 통해 건조과정에 대한 포화체적함수비는 $\theta_s=0.41$, 잔류체적함수비는 $\theta_r=0.03$, 습윤과정에서는 $\theta_s=0.39$, $\theta_r=0.03$ 의 결과를 얻었다. 또한 기율기가 급변하는 포화구간에서는 건조과정의 모관흡수력이 습윤과정의 모관흡수력

보다 크게 나타났다.

4.1.2 기존 제안 방법을 이용한 계수추정

불포화지반의 설계 및 거동 예측을 하기 위해서는 함수특성곡선을 수학적인 수식으로 표현하여야 한다. 이를 위한 방법으로는 Brooks and Corey(1964) 방법, van Genuchten(1980) 방법, Fredlund and Xing(1994) 방법 등이 있다. 이 방법들은 현재까지 불포화토의 특성을 예측하는데 많이 사용되어지고 있으며, 측정된 시험결과를 토대로 각종계수를 산출해 제안식에 대입함으로서 함수 특성곡선을 예측할 수 있다.

(1) Brooks and Corey 방법을 이용한 계수추정

Brooks and Corey(1964)는 간극크기분포지수(pore-size distribution index)를 지수로 하는 함수특성곡선식을 다음 식 4.1과 같이 제안하였다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{(u_a - u_w)_b}{(u_a - u_w)} \right]^\lambda \quad (4.1)$$



여기서,

λ =간극크기분포지수

S_e =유효포화도

θ =각 지점의 체적함수비

θ_s =포화체적함수비

θ_r =잔류체적함수비

$(u_a - u_w)_b$ =공기유입값

$(u_a - u_w)$ =모관흡수력

함수특성곡선의 필요한 계수인 간극크기분포지수 λ 와 공기유입값 $(u_a - u_w)_b$ 은 Fig. 4.3과 같이 모관흡수력과 유효포화도의 관계를 이용하여 구할 수 있다. 그림에 나타난 시험결과를 근사화한 직선의 기울기가 간극크기분포지수 λ 가 되고 S_e 가 1인 횡축과 만났을 때의 모관흡수력이 공기유입값 $(u_a - u_w)_b$ 이 된다.

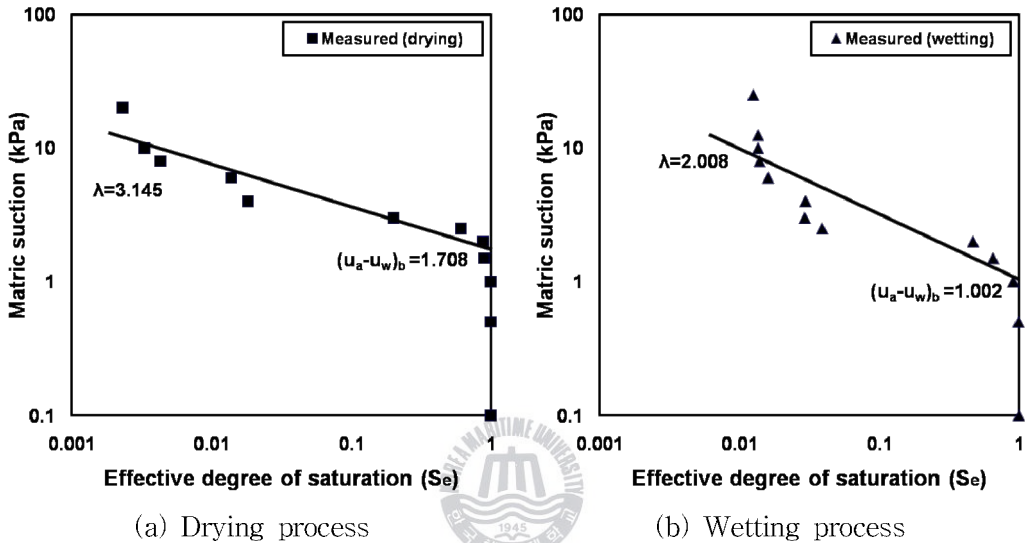


Fig. 4.3 Estimation of Brooks and Corey parameters

그림에서 보는바와 같이, 건조과정의 대한 λ 는 3.145, $(u_a - u_w)_b$ 는 1.708로 구할 수 있었으며 습윤과정에 대한 λ 는 2.008, $(u_a - u_w)_b$ 는 1.002로 구할 수 있었다. 이 계수들을 앞선 식 4.1에 대입하면 Brooks and Corey 방법을 이용한 건조과정 및 습윤과정의 대한 함수특성곡선을 도식할 수 있다.

하지만 Brooks and Corey 방법은 짜임새가 굵은(coarse textured) 흙에서 좋은 정확성을 나타내지만 짜임새가 가는(fine textured) 흙에서는 공기함입저항치가 잘 정의되지 않기 때문에 정확성을 떨어뜨린다는 단점이 있다.

(2) van Genuchten 방법을 이용한 계수추정

van Genuchten(1980)은 Mualem(1979)의 제안식을 기본으로 하여 유효포화도(S_e)와 모관흡수력($u_a - u_w$) 사이의 다음과 같은 관계식이 성립함을 제안하였다(식 4.2).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)^n]} \right]^m \quad (4.2)$$

여기서,

S_e =유효포화도

θ =정규체적함수비

θ_s =포화체적함수비

θ_r =잔류체적함수비

$h = u_a - u_w$ =모관흡수력

α =공기유입값과 관계된 계수

n =변곡점의 경사에 관계된 계수

m =잔류함수비에 관계된 계수



a , n , m 은 3개의 곡선맞춤계수로서 앞서 제안된 Brooks and Corey(1964) 함수특성곡선함수 보다 유연한 경향성을 보여준다. 각 계수들을 구하기 위해서는 우선 θ_s 와 θ_r 사이에 중간점 P를 구해야 한다. 그림상에서 포화체적함수비와 잔류체적함수비는 직선성을 나타내기 때문에 중간점 P를 쉽게 정할 수 있으며 그때의 모관흡수력은 $(u_a - u_w)_p$, 기울기는 S_p 로 나타낸다(Fig. 4.4). $(u_a - u_w)_p$ 와 S_p 를 알면 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 식 4.3a를 통해 구할 수 있으며, 이와 관계된 계수 n 과 α 는 식 4.3b와 식 4.3c를 통해 구할 수 있다.

$$m = 1 - \exp(-0.8S_p) \quad (0 < S_p \leq 1) \quad (4.3a)$$

$$= 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3} \quad (S_p > 1)$$

$$n = 1/(1 - m) \quad (4.3b)$$

$$\alpha = \frac{1}{(u_a - u_w)_p} (2^{1/m} - 1)^{1-m} \quad (4.3c)$$

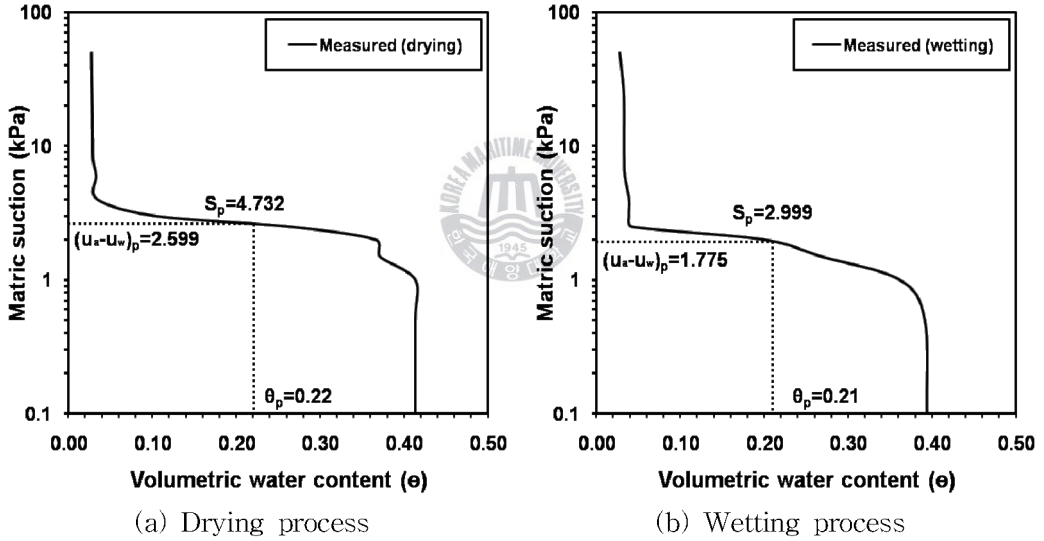


Fig. 4.4 Estimation of van Genuchten parameters

이와 같은 방법으로 계수를 구한 결과 건조과정에 경우 α 는 0.393, n 은 8.553, m 은 0.883으로 구할 수 있었으며 포화과정의 경우 α 는 0.593, n 은 5.561, m 은 0.820으로 구할 수 있다. 각 계수 및 포화체적함수비와 잔류체적함수비를 식 4.2에 대입하면 van Genuchten 방법에 의한 함수특성곡선을 유

도할 수 있다.

(3) Fredlund and Xing 방법을 이용한 계수추정

Fredlund and Xing(1994)은 모관흡수력의 최대 제한값(10^6kPa)을 고려하여 넓은 범위의 모관흡수력을 적용할 수 있는 방법을 식 4.4를 통해 제안하였다. 이 식은 모관흡수력이 0일 때의 체적함수비는 포화체적함수비와 동일하나 모관흡수력이 무한대(이때의 모관흡수력이 10^6kPa 이라고 가정)가 되면 체적함수비가 0에 접근한다는 시험적 증거(Croney and Coleman, 1961)를 토대로 유도되었다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = C(u_a - u_w) \left[\frac{1}{\ln \left\{ e + \left(\frac{u_a - u_w}{\alpha} \right)^n \right\}} \right]^m \quad (4.4)$$



여기서,

α =공기유입값과 관계된 계수

n =변곡점의 경사에 관계된 계수

m =잔류함수비에 관계된 계수

e =자연수 (2.71828)

$(u_a - u_w)$ =모관흡수력

$C(u_a - u_w)$ =보정함수

보정함수는 함수비 감소에 따라 모관흡수력이 커졌을 때의 함수특성곡선을 보정하기 위한 것으로서 모관흡수력이 낮을수록 보정함수는 1에 가까워진다(식 4.5).

$$C(u_a - u_w) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1,000,000}{(u_a - u_w)_r} \right)} \right] \quad (4.5)$$

여기서,

$(u_a - u_w)_r$ = 잔류 함수비의 모관흡수력

공기유입값의 관계된 계수(α)는 공기함입저항치와 관련된 값이지만 일반적으로 공기함입저항치 보다 큰 값을 가지며 함수특성곡선에서 변곡점의 모관흡수력으로 정의된다. 또한 n 은 함수특성곡선의 기울기와 관련이 있으며 m 은 높은 모관흡수력 범위에서 함수특성곡선의 변화와 관련이 있다. 함수특성곡선에 필요한 각 계수들을 결정하기 위해서는 Fig. 4.5와 같이 건조 및 습윤과정에 따른 상관관계곡선을 도시하고, 변곡점에 대한 함수비 θ_i 와 모관흡수력 $(u_a - u_w)_i$ 를 결정해야 한다. 함수비와 모관흡수력을 결정하면 관련계수인 α , n , m 을 다음과 같은 식 4.6을 통해 구할 수 있다.

$$\alpha = (u_a - u_w)_i \quad (4.6a)$$

$$m = 3.67 \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (4.6b)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72 S (u_a - u_w)_i \quad (4.6c)$$

여기서,

S = 변곡점의 경사

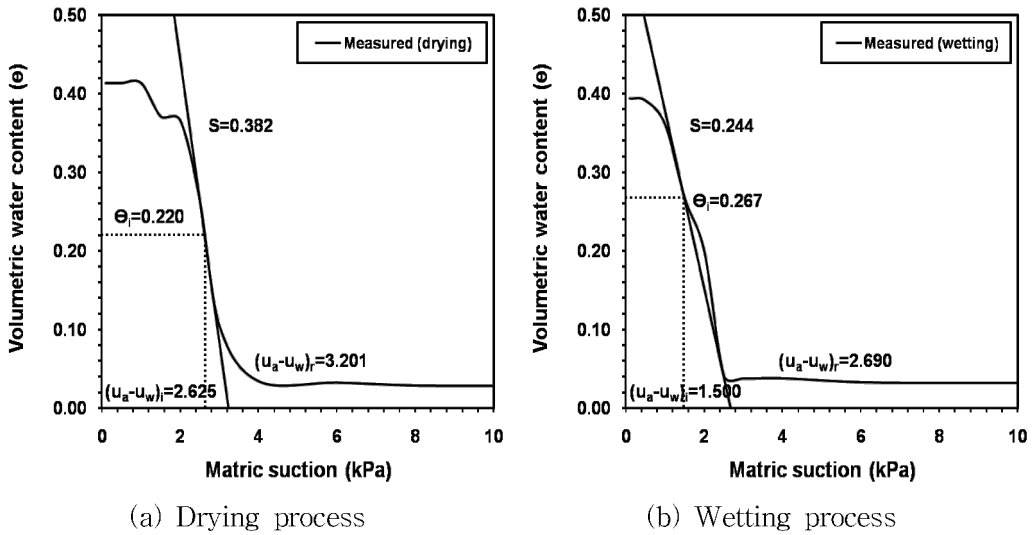


Fig. 4.5 Estimation of Fredlund and Xing parameters

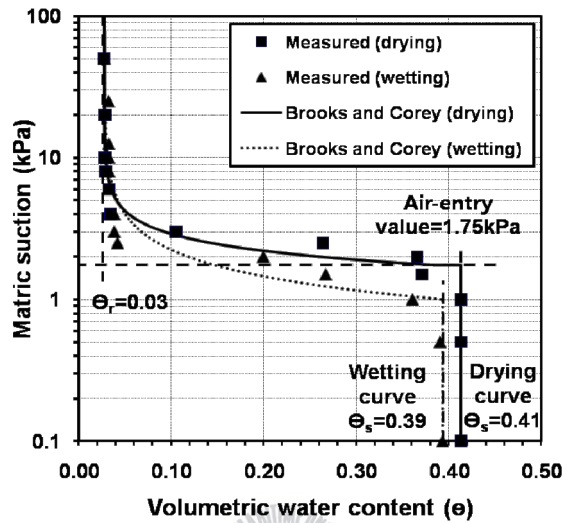
그림에서 보는바와 같이, 건조과정에 경우 α 는 2.625, m 은 2.315, n 은 11.630로 구할 수 있었으며, 습윤과정의 경우 α 는 1.500, m 은 1.430, n 은 7.679의 결과를 얻을 수 있었다. 이와 같은 방법을 통해 얻은 계수들을 식 4.4에 대입하면 함수특성곡선을 얻을 수 있으며 이는 Fredlund and Xing 방법을 이용한 함수특성곡선이 된다.

4.1.3 시험결과 및 제안식을 이용한 함수특성곡선

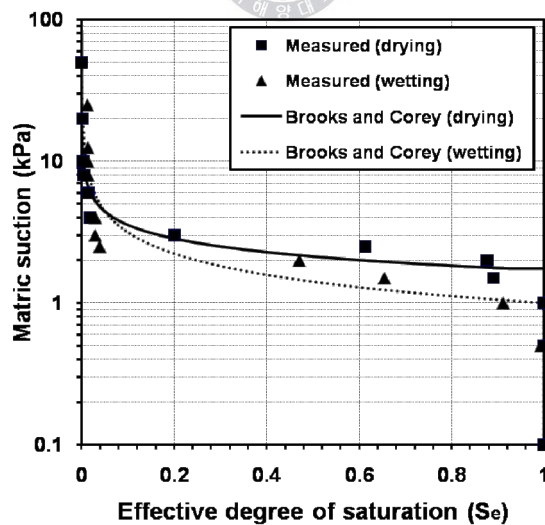
자동함수특성곡선측정장치를 통해 구한 주문진표준사의 건조 및 습윤과정에 따른 결과와 앞선 계수추정 결과를 통해 구한 Brooks and Corey, van Genuchten, Fredlund and Xing 함수특성곡선을 각각 비교해 보았다. 3개의 제안식 모두 시험결과를 비교적 잘 묘사하였으며 습윤과정에서의 관계곡선이 건조과정 결과를 답습하지 않는 이력현상(hysteresis)이 나타남을 확인할 수 있었다.

Table 4.3 Parameters for Brooks and Corey method

	λ	$(u_a - u_w)_b$	Air-entry value
건조과정	1.708	3.145kPa	1.75kPa
습윤과정	1.002	2.008kPa	



(a) Relationship of matric suction-volumetric water content

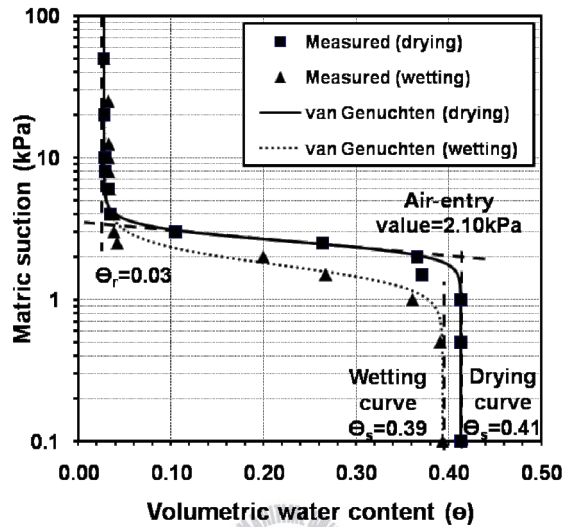


(b) Relationship of matric suction-effective degree of saturation

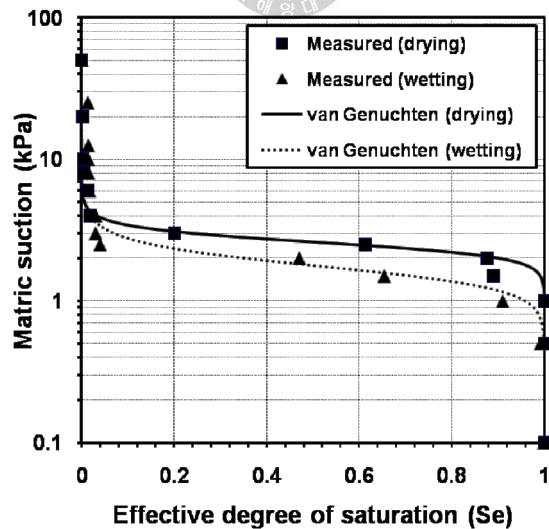
Fig. 4.6 SWCC by Brooks and Corey method

Table 4.4 Parameters for van Genuchten method

	S_p	$(u_a - u_w)_p$	a	n	m	Air-entry value
건조과정	4.732	2.599kPa	0.393	8.553	0.883	2.10kPa
습윤과정	2.999	1.775kPa	0.593	5.561	0.820	



(a) Relationship of matric suction-volumetric water content

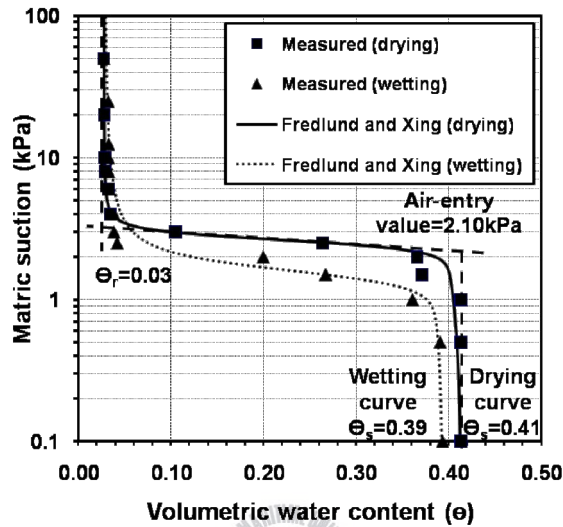


(b) Relationship of matric suction-effective degree of saturation

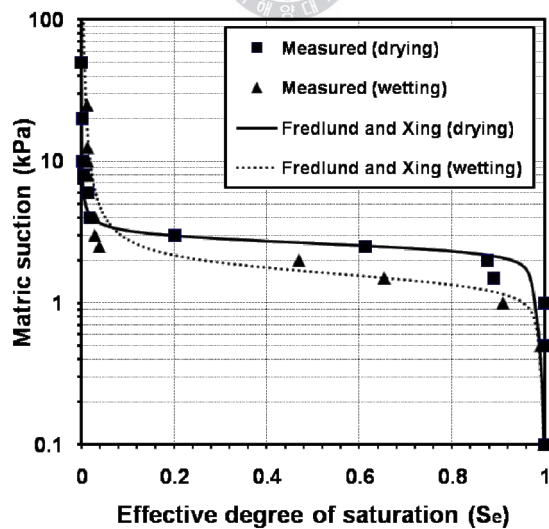
Fig. 4.7 SWCC by van Genuchten method

Table 4.5 Parameters for Fredlund and Xing method

	$(u_a - u_w)_i$	S	α	n	m	Air-entry value
건조과정	2.625kPa	0.382	2.625	2.315	11.630	2.10kPa
습윤과정	1.500kPa	0.244	1.500	1.430	7.679	



(a) Relationship of matric suction-volumetric water content



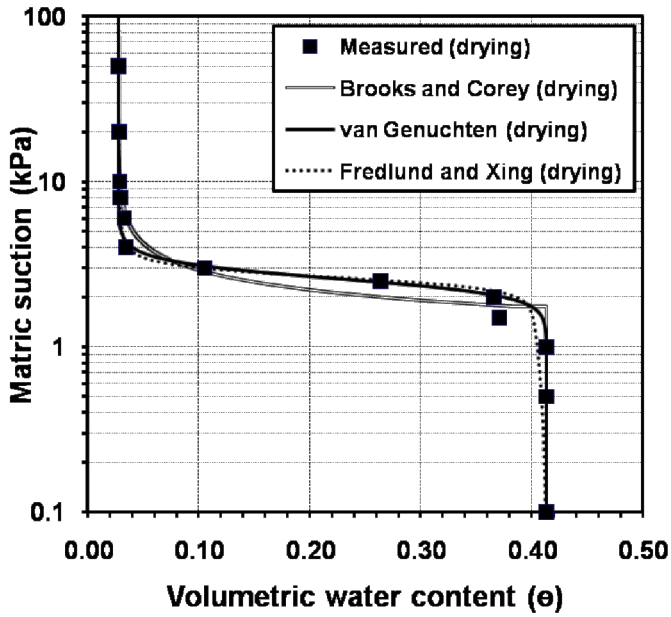
(b) Relationship of matric suction-effective degree of saturation

Fig. 4.8 SWCC by Fredlund and Xing method

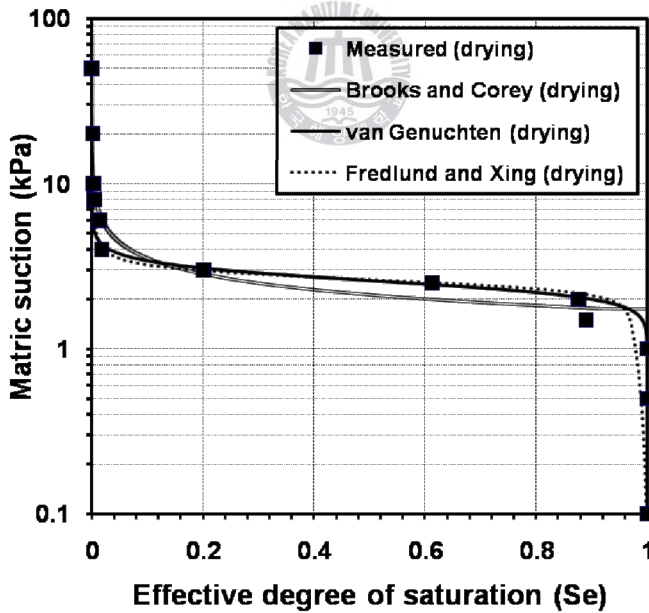
각 방법에 따라 시험결과를 도시한 모관흡수력과 체적함수비와의 관계는 S자 모양의 비선형적인 관계를 가지며 이는 모세관현상과 흡착현상으로 인한 결과로 설명되어지고 있다(김상규 등, 1996). Fig. 4.6과 같이 Brooks and Corey 방법을 이용한 함수특성곡선의 경우 최초 시료에 공기가 유입되는 공기함입저항치(air-entry value)는 1.75kPa로 나타났으며, van Genuchten 방법의 경우(Fig. 4.7)는 2.10kPa, Fredlund and Xing 방법의 경우(Fig. 4.8)는 2.10kPa으로 나타났다. 각 방법을 비교하기 위해 포화영역을 저포화영역($\theta=0\sim0.10$), 중간포화영역($\theta=0.10\sim0.35$), 고포화영역($\theta=0.35\sim0.45$)으로 구분하여 보면, 중간포화영역에서는 건조과정의 모관흡수력이 습윤과정의 모관흡수력보다 상대적으로 큰 값이 나타났으며 곡선의 기울기도 차이를 보이고 있다. 또한 고포화영역에서는 포화체적함수비가 서로 일치하지 않은 결과를 확인 할 수 있다. 이렇게 건조곡선과 습윤곡선이 일치하지 않는 이력현상(hysteresis)의 주원인은 주로 잉크병효과(ink bottle effect) 때문이라고 설명되고 있으며, 이는 건조과정에서는 물이 배수되는데 있어 작은 간극의 영향을 받으며 습윤과정에서의 물의 흡수는 큰 간극의 영향을 받는다는 것을 의미한다.

4.1.4 결과 비교

Brooks and Corey, van Genuchten 및 Fredlund and Xing 제안식에서 유도된 함수특성곡선을 건조 및 습윤과정으로 나누어 시험결과와 비교해 보았다.

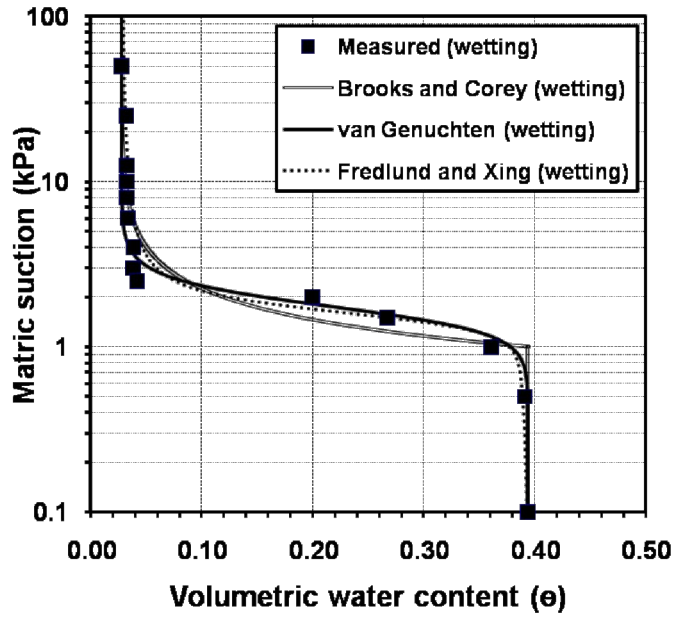


(a) Relationship of matric suction-volumetric water content

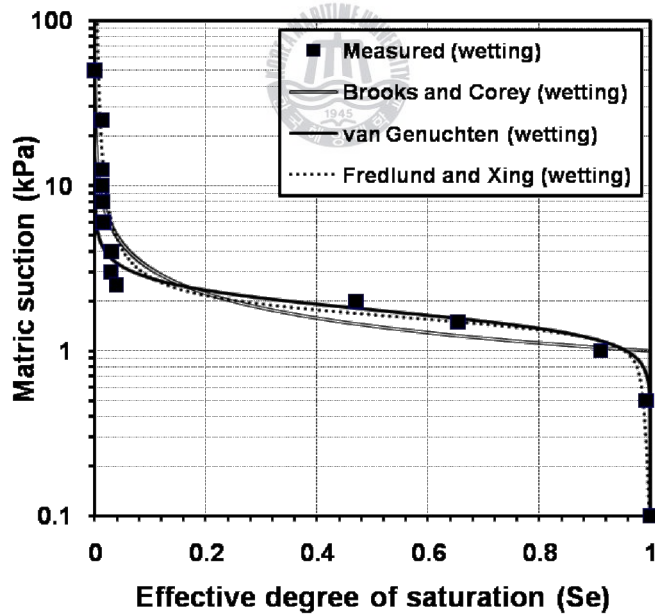


(b) Relationship of matric suction-effective degree of saturation

Fig. 4.9 Comparison for SWCC (drying process)



(a) Relationship of matric suction–volumetric water content



(b) Relationship of matric suction–effective degree of saturation

Fig. 4.10 Comparison for SWCC (wetting process)

Fig. 4.9와 4.10에 보이는 건조 및 습윤과정에 따른 함수특성곡선을 살펴보면 3가지 방법 모두 비교적 시험결과를 잘 묘사하고 있다. 하지만 보다 정확한 불포화상태에서의 흙의 특성을 파악하기 위해서는 신뢰성 있는 방법을 선정하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 시험결과와 제안식에 의한 결과를 비교하여 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 산정함으로서 각 제안식의 신뢰성을 확인해 보았다.

Table 4.6 Coefficient of determination analysis

	Brooks and Corey	van Genuchten	Fredlund and Xing
결정계수- R^2 (건조과정)	0.934	0.996	0.997
결정계수- R^2 (습윤과정)	0.944	0.985	0.948

Table 4.6을 통해 알 수 있듯이 건조과정에 경우 Fredlund and Xing 방법이 $R^2=0.997$, 습윤과정에 경우 van Genuchten 방법이 $R^2=0.985$ 로 가장 높은 결정계수를 보여 시험결과를 가장 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 Brooks and Corey 방법은 건조 및 습윤 측 모두 이 2가지 방법에 비해 상대적으로 낮은 결정계수를 보이며, 이는 함수특성곡선의 형태를 통해서도 확연하게 나타나고 있다. 결정계수가 높은 van Genuchten 방법과 Fredlund and Xing 방법은 서로 유사한 곡선의 흐름을 보이지만 특히 중간포화영역(0.10~0.35)에서 Brooks and Corey 방법의 함수특성곡선은 다른 두 방법에 비해 확연한 기울기 차이를 보이고 있으며 고포화영역(0.35~0.45)에서도 다른 두 방법에 비해 시험결과와 큰 차이를 보이고 있다. 이는 모관흡수력-유효포화도 관계를 직선으로 가정하고 그 직선에 따른 함수특성곡선을 그리게 됨으로써 생기는 영향 때문이라고 사료된다.

본 연구에서는 건조 및 습윤과정의 결과를 종합해 보았을 때 상대적으로 결정계수가 높은 van Genuchten 제안식이 시험결과를 가장 잘 표현하여 모래의 함수특성곡선을 가장 신뢰성 있게 분석한다고 평가한다.

4.2 주문진표준사의 응력상태 평가

4.2.1 불포화토 유효응력 이론

지반의 거동은 흙입자가 부담하는 응력뿐만 아니라 흙 속에 지하수가 받는 응력의 상태에 따라서 구분되어 해석해야 한다. 이렇게 흙입자가 부담하는 응력을 유효응력이라 하며 이 개념은 Terzaghi(1943)에 의해 제안되었다.

Terzaghi 이론에 의하면 다음 식 4.7과 같이 표현되는 유효응력은 전응력과 간극수압의 차로 정의되며 간극수압으로 인해 유효응력은 감소하게 된다. 하지만 이 이론은 간극이 모두 물로 차있는 포화상태의 흙에 대해서만 유효하다. 이에 Bishop(1959)은 Terzaghi의 포화상태에서의 유효응력식을 확장하여 흙이 불포화상태로 존재할 때 모관흡수력을 고려한 불포화토 유효응력 이론을 처음으로 제안하였다(식 4.8).

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (4.7)$$

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (4.8)$$

여기서,

σ = 전응력

σ' = 유효응력

u_a = 간극공기압

u_w =간극수압

χ =유효응력 계수

$(u_a - u_w)$ =모관흡수

Bishop이 제안한 유효응력 계수 χ 는 포화도(S)와 관계하여 0부터 1까지의 범위를 가지며, $\chi=1$ 일 경우는 $S=1$ 인 포화상태의 흙을 나타낸다. 또한 $\chi=0$ 이면 건조상태를, $0 < \chi < 1$ 은 불포화상태를 나타내며 χ 가 1에 가까워질수록 Terzaghi 유효응력식에 수렴하게 된다.

Bishop의 유효응력이론을 Mohr-Coulomb 파괴포락선에 적용하면 전단강도는 다음과 같은 식 4.9로 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)]\tan\phi' \quad (4.9)$$

여기서,

τ_f = 전단강도

σ = 순연직응력

c' = 유효점착력

ϕ' = 내부마찰각



그 후 Jennings and Burland(1962)는 응력변수를 순평균응력과 모관흡수력 향으로 분리할 것을 제안하였으며 Fredlund and Morgenstern(1977)은 분리된 응력변수를 사용하여 오늘날 주로 이용되는 불포화토 전단강도식을 제안하였다(식 4.10).

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (4.10)$$

Fredlund and Morgenstern의 전단강도식을 살펴보면 점착력 항과 수직응력에 관한 항은 Mohr-Coulomb 파괴기준을 만족하지만 3번째 항은 모관흡수력과 관계하는 추가적인 내부마찰각 항으로서 수직응력과 모관흡수력은 서로 독립적인 항으로 존재함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4.11을 통해서 자세히 설명된다.

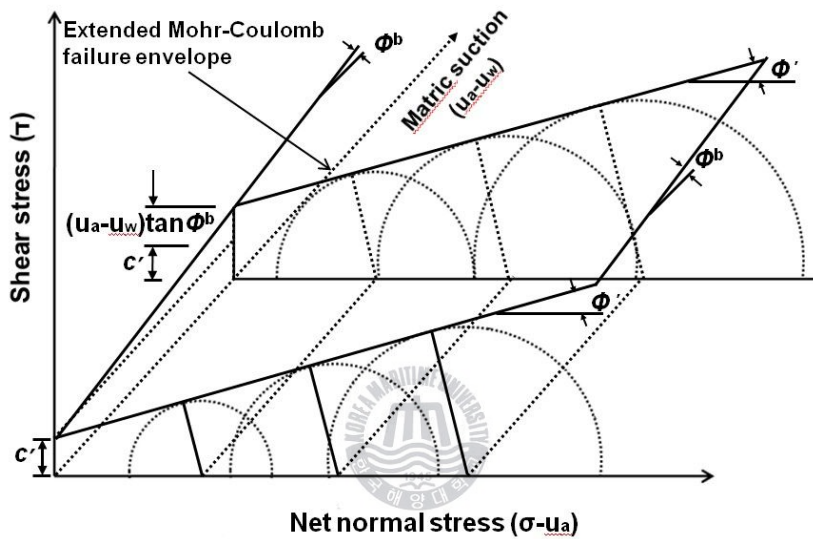


Fig. 4.11 Expanded Mohr-Coulomb failure envelope curve
(Fredlund et al., 1978)

Fredlund and Morgenstern의 전단강도식은 오늘날 불포화토를 해석하는데 가장 널리 쓰이는 방법이다. 하지만 앞선 두 식들은 불포화토의 응력상태와 그에 따른 거동을 묘사하는데 있어 많은 불확실성을 가지고 있다. 그 이유는 Bishop의 방법은 시험적인 방법이나 이론적인 방법을 통해 유효응력계수 χ 를 적용하는데 많은 제한이 따르며, Fredlund and Morgenstern의 방법은 넓은 범위의 포화도에 따른 독립적인 응력변수의 특성을 파악하는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 개념적 및 시험적으로 모관흡수력에 의한 유효점착력의 증가를 나

타내는 ϕ^b 값에 대한 불확실성을 가지고 있기 때문이다.

최근 Lu and Likos(2004, 2006)는 Terzaghi 및 Bishop의 유효응력 공식을 확장하여 불포화토에서 응력상태를 대변하는 흡입응력(suction stress)에 관한 이론을 소개하여 불포화토의 응력상태에 따른 새로운 기준을 제안하였다(식 4.11).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w)S_e \quad (4.11)$$

여기서,

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)S_e = \text{흡입응력}$$

Lu and Likos가 제안한 유효응력식(식 4.11)을 살펴보면 흙이 포화상태로 존재할 때는 유효포화도 S_e 가 1이 되어 Terzaghi의 유효응력이론과 같음을 알 수 있으며, 불포화토의 경우 포화도에 따라 결정되는 유효응력은 외부에 다른 응력작용 없이 오로지 흡입응력에 영향을 받는다고 판단할 수 있다. 이때, 흡입응력은 흙의 포화도와 밀접한 관계를 가지기 때문에 불포화토의 응력상태를 평가할 수 있는 지표로 활용될 수 있으며, 부의 값을 가지고 있어 유효응력을 증가시키는 작용을 한다. 흡입응력에 관한 보다 자세한 내용은 다음 절에서 설명 하도록 하겠다. 다시 이를 전단강도이론에 비추어 생각해보면 식 4.12와 같이 Mohr-Coulomb 파괴기준을 만족하는 불포화토 전단강도식을 얻을 수 있다.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \beta = c' + [(\sigma - u_a) - \sigma^s] \tan \beta \quad (4.12)$$

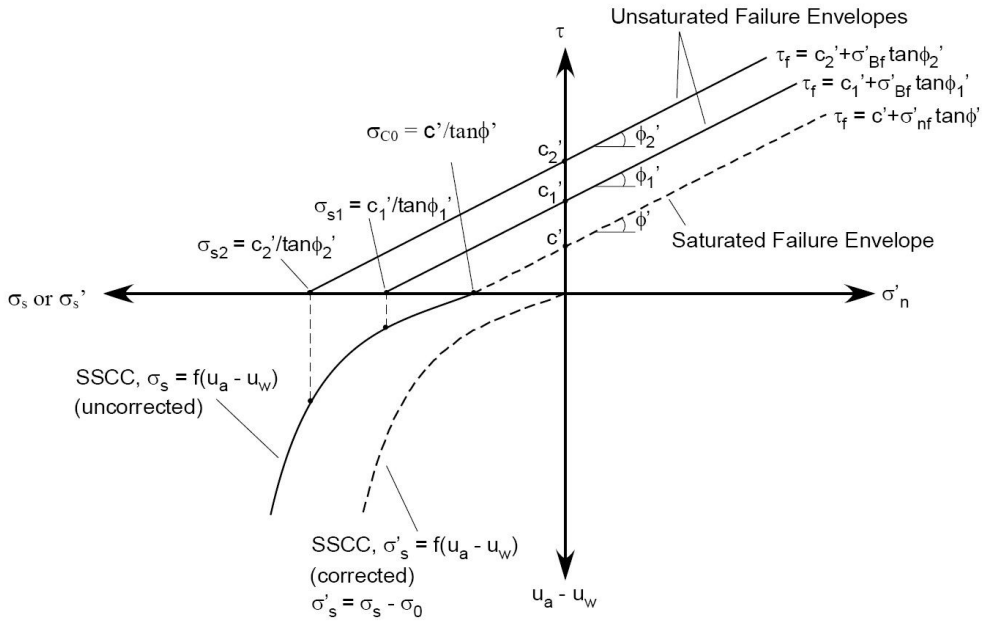


Fig. 4.12 Effect for suction stress according to shear strength
(Lu and Likos, 2006)



4.2.2 흡입응력특성곡선

일반적으로 불포화토에서의 간극수는 입자간의 물리 화학적인 힘과 모관력 등에 의해 흙 속에 보유된다. 이렇게 흙이 간극수를 보유하는 힘은 불포화토가 가지는 에너지로 표현될 수 있으며 이는 다음 식 4.13과 같이 간극체적당 흙에 존재하는 간극수는 모관흡수력과 관계하여 흙이 가지는 전체에너지를 나타낼 수 있다(Lu and Godt, 2008).

$$E_w = -(u_a - u_w) \frac{V_w}{V_v} \quad (4.13)$$

이런 전체에너지에서 흡입자와 물의 접촉면에서 발생하는 강한 흡착력을 제

외한 대부분의 에너지가 불포화토의 흡입응력으로 작용하며 이는 다음 식 4.14와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{pore\ water} = \sigma^s = -(u_a - u_w) \frac{V_w - V_r}{V_v - V_r} \quad (4.14)$$

여기서,

$u_a - u_w$ = 모관흡수력

V_v = 전체간극수체적

V_w = 간극수체적

V_r = 잔류간극수체적

앞선 식 4.14를 전개하면 유효포화도(식 4.15a)와 유효체적함수비(식 4.15b)에 관한 항으로 각각 나타낼 수 있다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \frac{\frac{V_w}{V_v} - \frac{V_r}{V_v}}{1 - \frac{V_r}{V_v}} = -(u_a - u_w) \frac{S - S_r}{1 - S_r} = -(u_a - u_w) S_e \quad (4.15a)$$

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \frac{\frac{V_w}{V_v} - \frac{V_r}{V_v}}{\frac{V_v}{V} - \frac{V_r}{V}} = -(u_a - u_w) \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = -(u_a - u_w) \theta_e \quad (4.15b)$$

여기서,

S = 정규포화도

S_r = 잔류포화도

S_e = 유효포화도

θ = 정규체적함수비

θ_r = 잔류체적함수비

θ_e = 유효체적함수비

앞선 식을 통해 알 수 있듯이 흡입응력은 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의되며 이는 Fig. 4.13과 같이 함수특성곡선에서의 면적을 나타내게 된다. 이때 흡입응력은 모관흡수력 또는 유효포화도와 관계하여 특정한 곡선을 이루는데 이를 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristic Curve, SSCC)이라 한다.

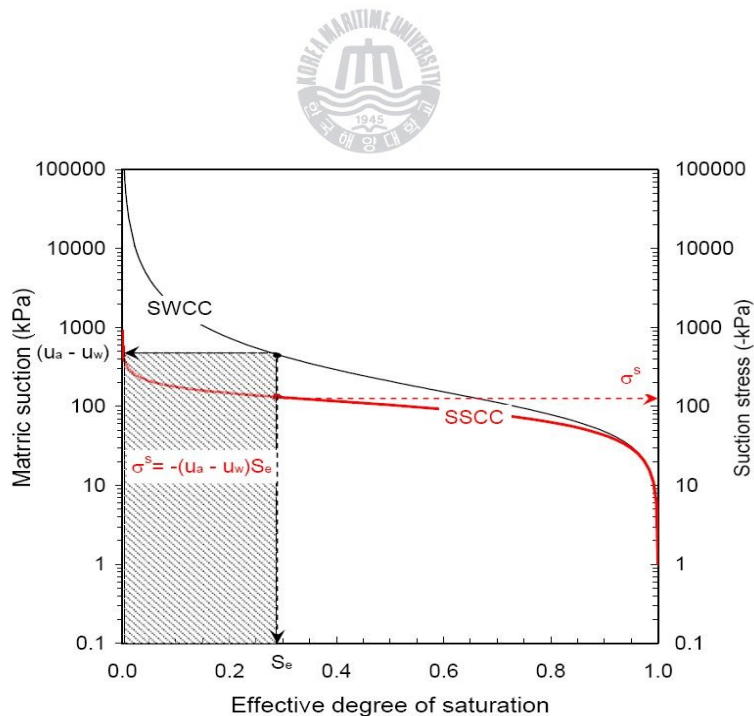


Fig. 4.13 Relationship between SWCC and SSCC
(Lu and Godt, 2008)

Fig. 4.13을 통해 알 수 있듯이 흡입응력특성곡선은 함수특성곡선과 밀접한 관계를 가지기 때문에 함수특성곡선과 관련된 제안식을 이용하여 흡입응력특성곡선에 대한 정량화된 상관식을 얻을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 흡입응력 이론을 토대로 앞서 설명했던 van Genuchten의 제안식을 이용하여 흡입응력 특성곡선을 유도하였다. van Genuchten 제안식은 다음 식 4.16과 같으며 이를 유효포화도와 유효체적함수비에 대해 정리하여 식 4.15에 대입하면 식 4.17과 식 4.18과 같은 흡입응력특성곡선 상관식을 유도할 수 있다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (4.16)$$

여기서,

α =공기유입값과 관계된 계수

n =변곡점의 경사에 관계된 계수



(흡입응력-유효포화도 관계)

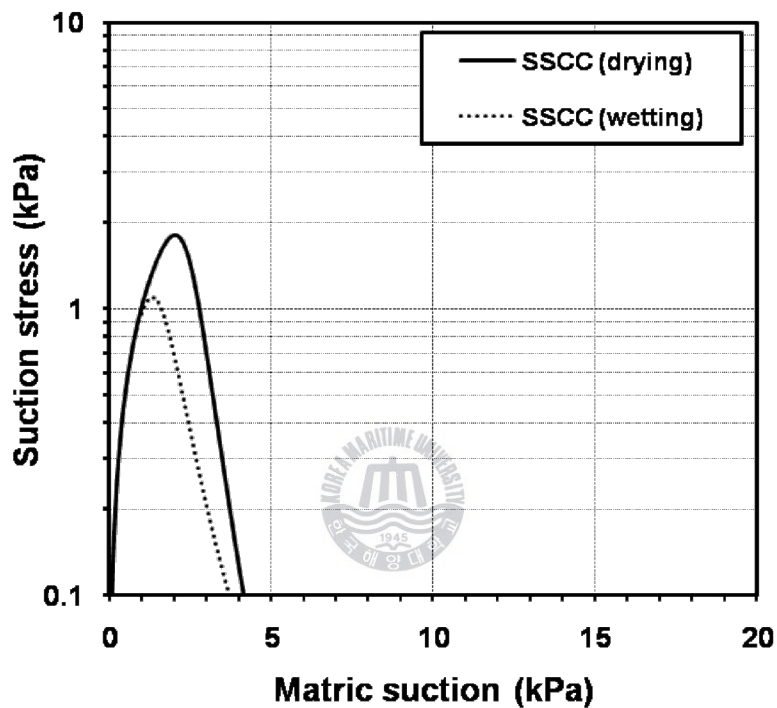
$$\sigma^s = -\frac{S_e}{\alpha} \left(S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad 0 \leq S_e \leq 1.0 \quad (4.17)$$

(흡입응력-모관흡수력 관계)

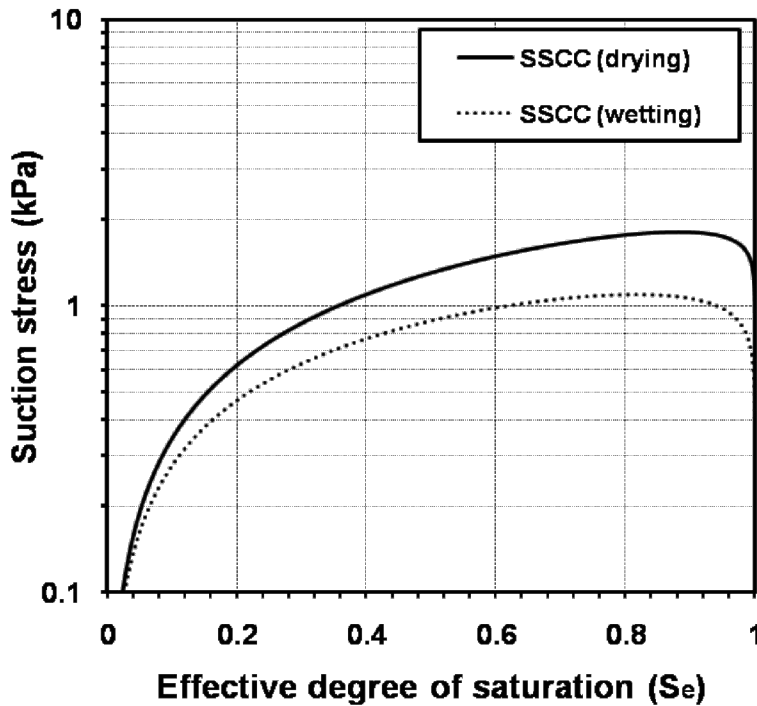
$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq (u_a - u_w)_b \quad (4.18a)$$

$$\sigma^s = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} \quad u_a - u_w > (u_a - u_w)_b \quad (4.18b)$$

여기서, 상관식에 사용되는 계수(α , n)는 van Genuchten 제안식의 계수와 동일하기 때문에 흡입응력특성곡선은 함수특성곡선과 본질적으로 밀접한 관계에 있음을 확인시켜준다. 다음 Fig. 4.14는 주문진표준사의 건조 및 습윤과정에 따른 흡입응력특성곡선을 나타낸다.



(a) Relationship of suction stress-matric suction



(b) Relationship of suction stress-effective degree of saturation

Fig. 4.14 SSCC of Joomunjin sand

※ 여기서, 불포화토의 흡입응력은 부(-)의 값을 갖지만 크기 비교를 위해 정(+)의 값으로 나타냈다.

결과를 살펴보면 건조 및 습윤과정에 따른 흡입응력은 건조상태에서부터 일정포화영역에 도달할 때까지 비선형적으로 증가하지만 일정 포화도를 넘어서면 흡입응력이 감소하여 완전포화가 되면 0이 됨을 알 수 있다. 즉, 건조 및 습윤 과정에 따른 흡입응력특성곡선은 서로 비슷한 응력거동특성을 보이고 있지만 앞선 함수특성곡선에서의 이력현상에 의해 그 값에서는 약간의 차이를 보이고 있다.

먼저 건조과정에 따른 흡입응력특성곡선을 살펴보면 최대흡입응력은 1.8kPa이며 흡입응력이 작용하는 모관흡수력의 범위는 0~6.3kPa로 나타났다. 또한

습윤과정에서는 최대흡입응력은 1.1kPa이며 흡입응력이 작용하는 모관흡수력의 범위는 0~8.6kPa로 나타났다. 이를 표로 정리해보면 다음과 같다

Table 4.7 Comparison for SSCC

	최대흡입응력 (kPa)	흡입응력이 작용하는 모관흡수력범위
건조과정	1.8kPa	0~6.3kPa
습윤과정	1.1kPa	0~8.6kPa

이를 종합해보면, 흡입응력은 흙이 오로지 잔류체적함수비 이상의 불포화상태일 때만 존재하며, 이때 흙의 강도를 증가시키는 요인으로 작용한다고 확인할 수 있다.

지금까지 함수특성에 따른 불포화토의 응력상태는 흡입응력특성곡선으로 대표되며, 이는 불포화지반의 강도를 해석하는데 중요한 요소로 작용한다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 이러한 흡입응력이 실제 불포화지반강도에 어떻게 영향을 미치는지 거시적인 방법으로 살펴볼 필요가 있다. 따라서 다음 절을 통해 시험시료와 동일한 불포화 무한사면을 가정하고 그에 따른 사면 안전성을 평가하고자 한다.

4.3. 불포화 무한사면 안정해석

4.3.1 불포화 무한사면 이론

일반적으로 강우로 인한 사면파괴는 지하수위 상승으로 인하여 사면지반내의 유효응력을 감소시켜 파괴가 유발되는 것으로 알려져 있으나, 실제 파괴는 강우의 침투로 침윤선이 임계깊이에 도달하여 얕은 사면파괴를 발생시킨다(조성은 등, 2001). 이러한 현상은 침윤선이 진행함에 따라 흙의 전단강도에 기여하는 모관흡수력이 사면의 파괴를 유발할 만큼 감소하기 때문이다. 이와 같이 사면의 길이에 따른 깊이의 비가 큰 평면파괴의 경우 모관흡수력의 영향을 고려

한 무한사면 해석을 통해 지반의 안정성을 파악하는 것이 바람직하다. 따라서 다음 Fig. 4.15와 같이 지하수위를 고려한 불포화 무한사면을 가정하였다.

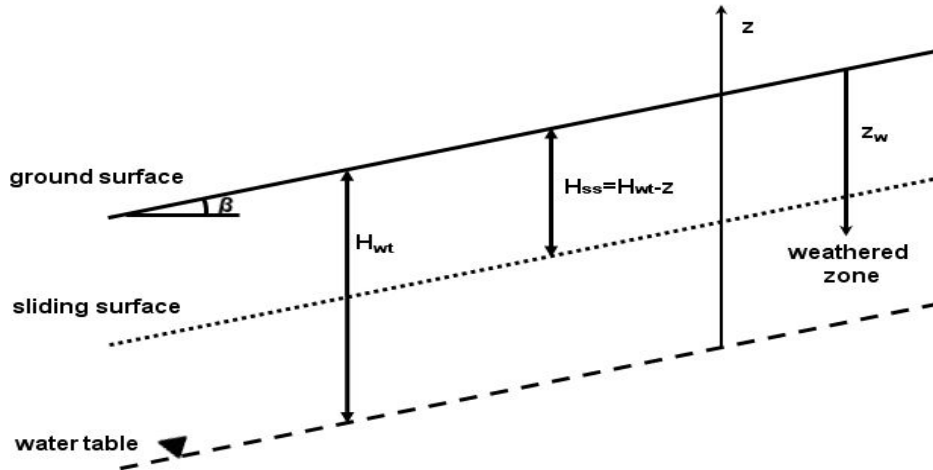


Fig. 4.15 General infinite slope

Fig. 4.15에서 H_{wt} 는 지표면과 지하수위의 깊이를 의미하며 H_{ss} 는 파괴가 일어난다고 가정하였을 때 지표면과 가상의 파괴면 사이에 거리를 나타낸다. 또한 z 는 지하수위로부터의 거리를 의미하며, z_w 는 풍화작용범위, β 는 사면의 경사를 나타낸다. 이를 토대로 일반적인 사면의 안전율은 다음 식 4.19와 같이 표현할 수 있다.

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{\gamma H_{ss} \sin \beta \cos \beta} \quad (4.19)$$

앞선 흡입응력을 고려한 유효응력(식 4.11)을 식 4.19에 대입하여 정리하면 다음 식 4.20로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{c' + [\gamma H_{ss} \cos^2 \beta - \sigma^s] \tan \phi'}{\gamma H_{ss} \sin \beta \cos \beta} = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + \frac{2c'}{\gamma H_{ss} \sin 2\beta} - \frac{\sigma^s}{\gamma H_{ss}} (\tan \beta + \cot \beta) \tan \phi' \quad (4.20)$$

일반적인 사면안정해석시 흙의 종류가 일정하면 깊이에 상관없이 내부마찰각 ϕ' 는 일정하다고 가정하였다. 하지만 실제 사면은 깊이에 따라 간극률 n 의 차이가 있으며 이는 ϕ' 에 영향을 미친다는 사실을 여러 연구자들의 실험적 근거를 통해 밝혀졌다(Mariachi et al., 1969; Cornforth, 1973; Cornforth, 2005). 그 예로 실제 사면은 지표 일정 깊이까지 풍화작용에 영향을 받아 상대적으로 큰 간극률을 가지며 깊이가 깊어질수록 자중에 영향을 받아 간극률이 상대적으로 작은 값을 보인다. 즉, 내부마찰각은 간극률에 따라 반비례함을 알 수 있으며 다음 식 4.21과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi = \phi_o + \frac{\Delta \phi}{\Delta n} (n_o - n) \quad (4.21)$$



여기서,

ϕ_o =지표면에서의 내부마찰각

n_o =지표면에서의 간극률

$\Delta \phi$ =풍화영역깊이(z_w)에서의 내부마찰각 변화량

Δn =풍화영역깊이(z_w)에서의 간극률 변화량

또한 깊이에 따라 지반의 자중 또는 외부 하중으로 인해 감소되는 간극률은 다음 식 4.22와 같이 나타낼 수 있다.

$$n = n_o - \frac{\Delta n}{1 + \frac{z_w}{H_{ss}}} \quad (4.22)$$

다시 식 4.22를 정리하여 식 4.21에 대입하면 다음과 같이 사면깊이에 따라 변화되는 내부마찰각을 유도할 수 있다(식 4.23). Fig. 4.16은 여러 조건의 풍화영역깊이에 따라 상대적으로 변화하는 내부마찰각($(\phi - \phi_o) / \Delta \phi$)을 도시하였다.

$$\phi = \phi_o + \frac{\Delta \phi}{1 + \frac{z_w}{H_{ss}}} \quad (4.23)$$

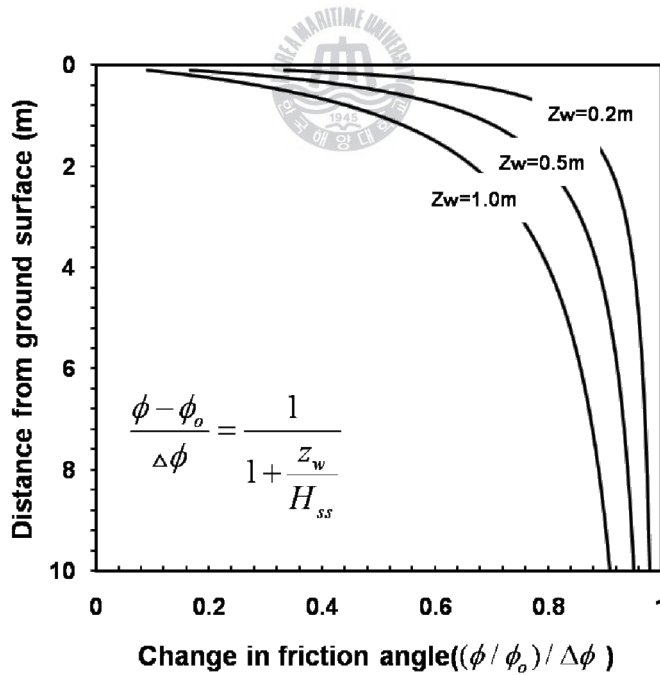


Fig. 4.16 Variation of internal friction with weathered zone depth

이를 종합해보면 포화 및 불포화사면의 안전율을 평가하는 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 4.24). 첫 번째 항은 내부마찰각에 대한 항, 두 번째는 점착력에 관한 항, 그리고 마지막 항은 흡입응력의 관한 항을 나타내며 이는 부(-)의 값을 나타내기 때문에 불포화상태 사면에서의 안전율을 높이는 역할을 한다.

$$F(z) = \frac{\tan\phi'(z)}{\tan\beta} + \frac{2c'}{\gamma(H_{wt}-z)\sin 2\beta} - r_u(\tan\beta + \cot\beta)\tan\phi'(z)$$

$$r_u = \frac{\sigma^s}{\gamma(H_{wt}-z)} \quad , \quad \phi(z)' = \phi_o + \frac{\Delta\phi}{1 + \frac{z_w}{H_{ss}}} \quad (4.24)$$

여기서, z 는 지하수위로부터의 높이(distance above water table, m)로서 이는 모관흡수력(matric suction, kPa)을 수두(suction head, 모관흡수력/물의 단위중량, m)로 표현한 것을 의미한다. 따라서, 식 4.24는 사면깊이에 따라 변화하는 주문진표준사의 불포화정도를 해석하고 그에 따른 안전율을 판단할 수 있다.

4.3.2 불포화 무한사면 해석

지하수위가 존재하는 불포화 무한사면의 깊이에 따른 안정성을 평가하기 위해 Fig. 4.17과 같이 주문진표준사로 이루어진 사면을 가정하였다. Table 4.8은 그에 따른 지반조건을 나타낸다.

Table 4.8 Conditions of infinite slope

지반조건 = 상대밀도 75% 주문진표준사			
함수특성곡선 (van Genuchten parameter)	건조과정	$\alpha(\text{kPa}^{-1})$	0.393
		$\alpha(\text{kPa}^{-1})$	0.593
	습윤과정	n	8.553
		n	5.561
직접전단시험 (Direct shear test)	$\phi_o(^{\circ})$		43.27
	$c'(\text{kPa})$		0
사면 조건 (Slope conditions)	$\Delta\phi(^{\circ})$		6
	$\beta(^{\circ})$		30, 40, 50, 60, 70
	$H_{wt}(\text{m})$		10
	$z_w(\text{m})$		0.5

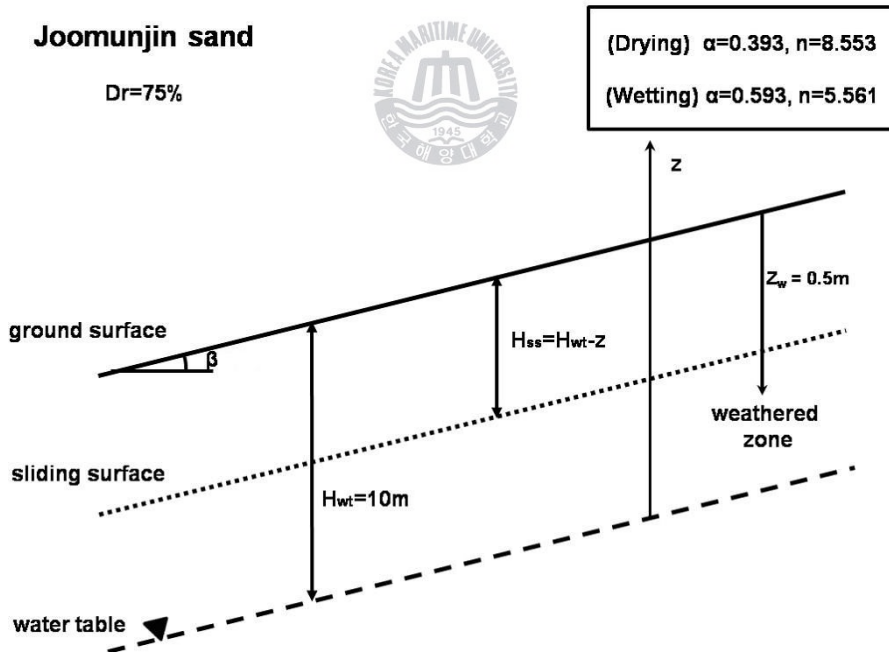


Fig. 4.17 Infinite slope formed by Joomunjin sand

Table 4.8에서 볼 수 있듯이 대상 사면은 시험시료와 동일한 상대밀도 75%의 주문진표준사로 이루어졌으며 사면 경사는 30° , 40° , 50° , 60° , 70° 로 가정하였다. 또한 풍화영역 깊이는 0.5m, 풍화영역 내에서의 내부마찰각 변화는 6° 라 가정하였다(Lu and Godt, 2008). 사면 안전율 계산에 필요한 계수 α 와 n 은 앞선 van Genuchten의 함수특성곡선 제안식에서 구한 계수와 동일하며 전단시험결과 주문진표준사는 점착력 $c=0$, 내부마찰각 $\phi'=43.27$ 의 물리적 특성을 갖는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 함수변화특성에 따른 불포화사면의 안정성을 평가하는데 목적이 있으므로 지표로부터 10m 아래에 지하수위가 존재한다고 가정하였다. 여기서 가정한 지하수위는 지반의 불포화 거동 특성을 살펴보기 위한 것으로서 모관흡수력과 밀접한 관계를 한다. 따라서, 지하수위로부터 높이에 따른 함수특성곡선을 나타내면 Fig. 4.18과 같다.

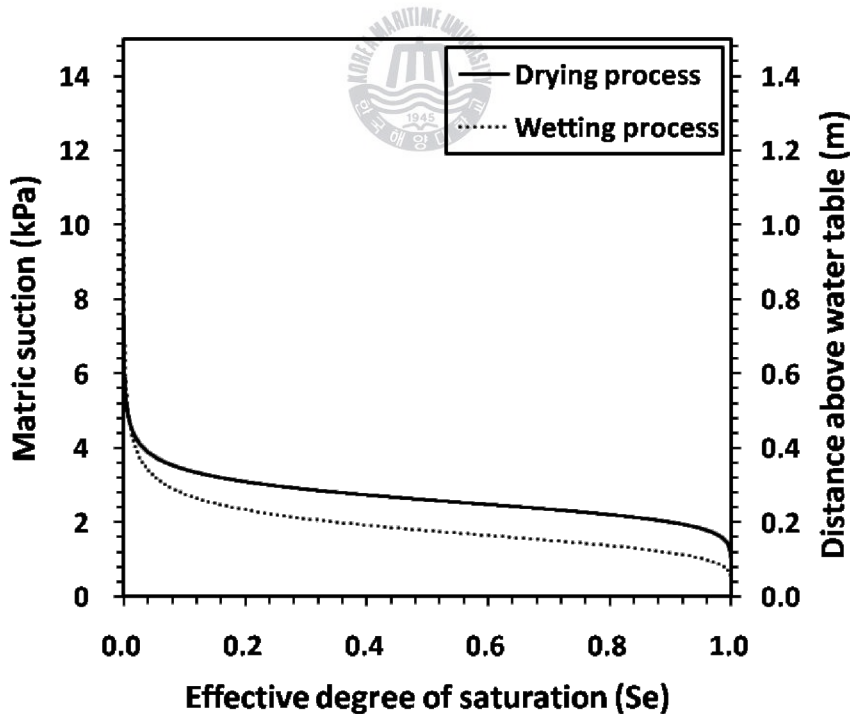


Fig. 4.18 SWCC of Joomunjin sand with ground water level

이로서, 식 4.24를 이용해 지하수위 영향에 따른 사면의 안정성을 평가한 결과 주문진표준사로 이루어진 무한사면의 건조 및 습윤과정에 따른 깊이 별 안전율은 Fig. 4.19 및 4.20과 같다.

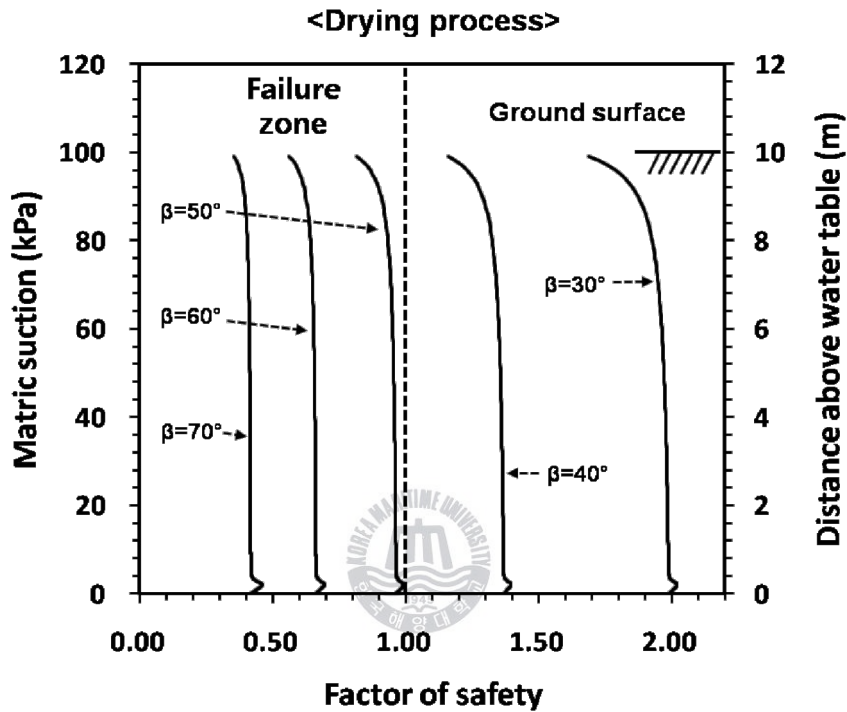


Fig. 4.19 Evaluation of factor of safety (drying process)

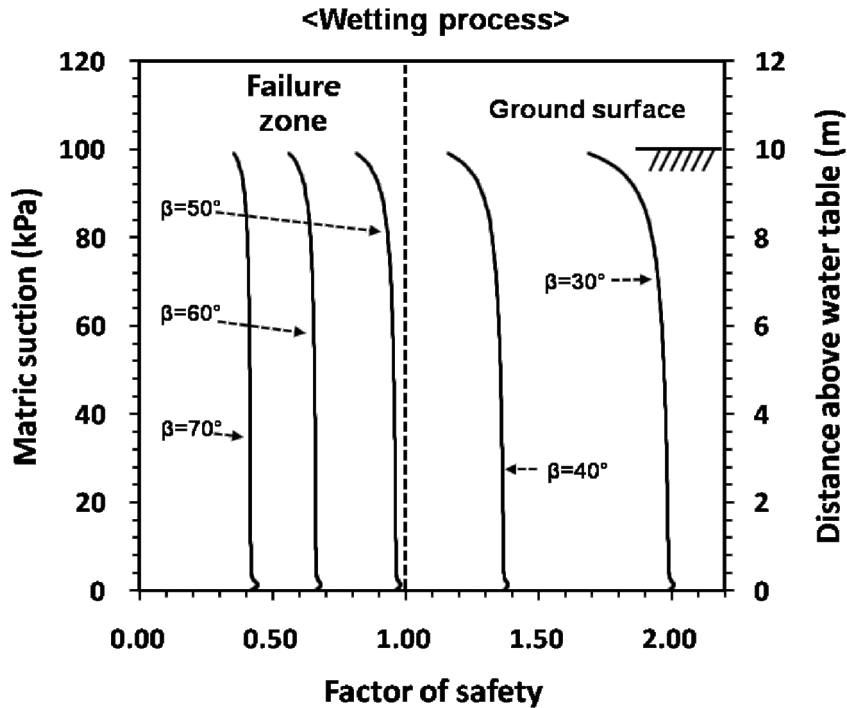


Fig. 4.20 Evaluation of factor of safety (wetting process)

깊이 별 사면의 안전율을 살펴본 결과 30° 및 40° 의 사면 경사에서는 건조 및 습윤과정 모두 사면 안정조건($F_s > 1$)을 만족하지만 50° , 60° , 70° 로 사면 경사가 커질수록 불안정한 사면($F_s < 1$)의 형태를 보이고 있다. 또한 지표면에 가까워질수록 깊이에 따른 내부마찰각의 감소로 인해 안전율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 여기서 주목해야 할 것은 지하수위로부터 일정 높이까지 안전율에 증가를 보이고 있다는 점이다. 이는 흡입응력이 작용하는 범위로서 흡입응력으로 인해 그림에서와 같이 지하수위와 인접한 지반의 강도가 증가한 결과로 설명된다. 이렇게 흡입응력이 사면 안전율에 미치는 영향은 Fig. 4.21과 Fig. 4.22를 통해 보다 자세히 설명된다.

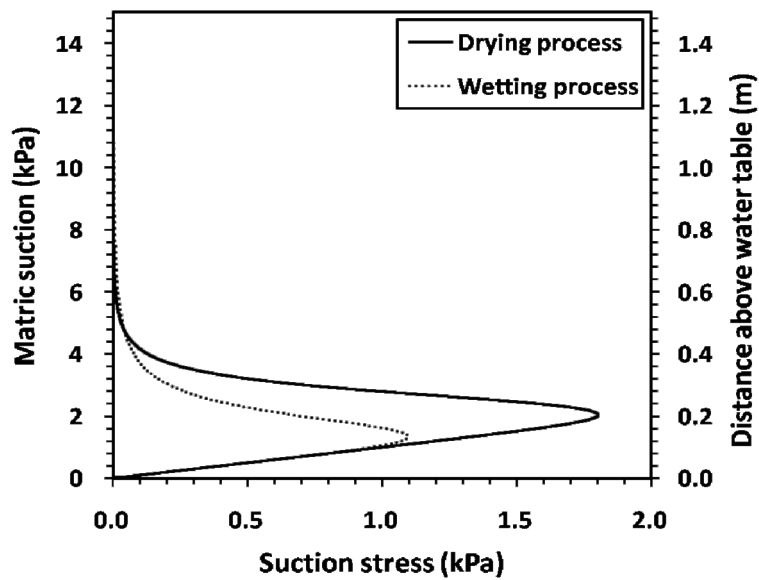
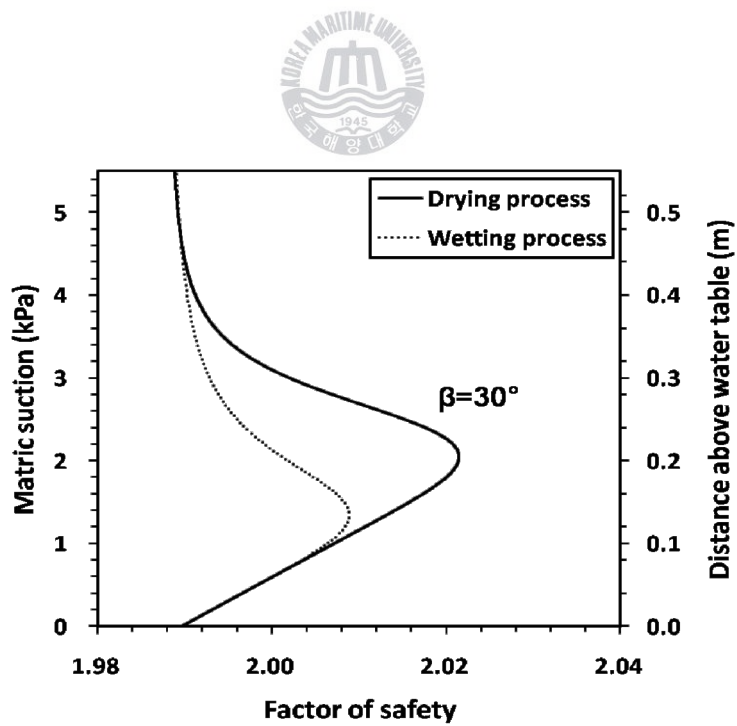
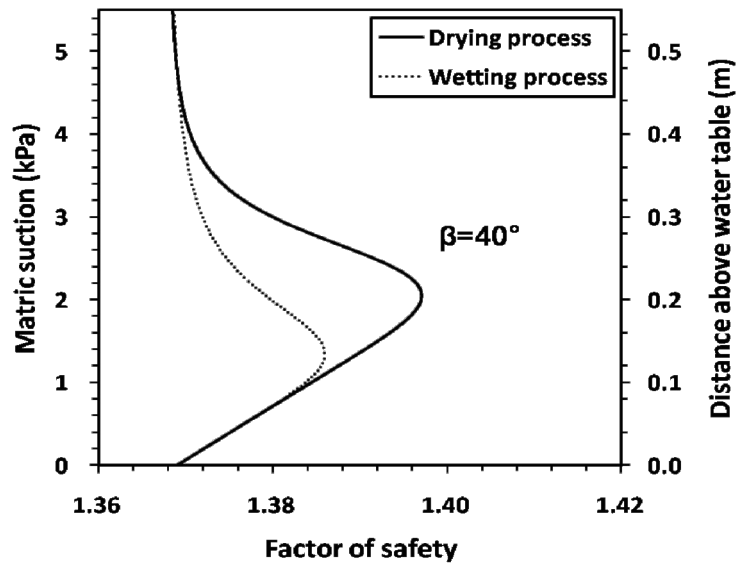


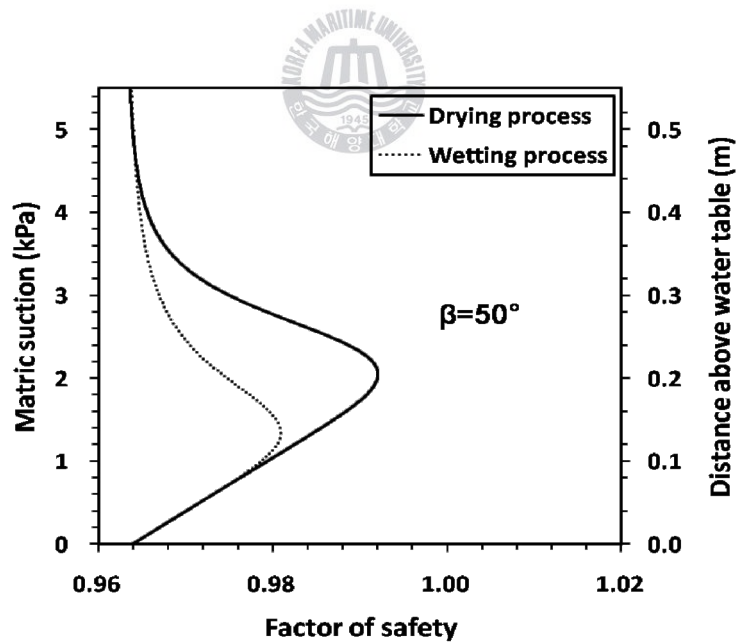
Fig. 4.21 SSCC of Joomunjin sand with ground water level



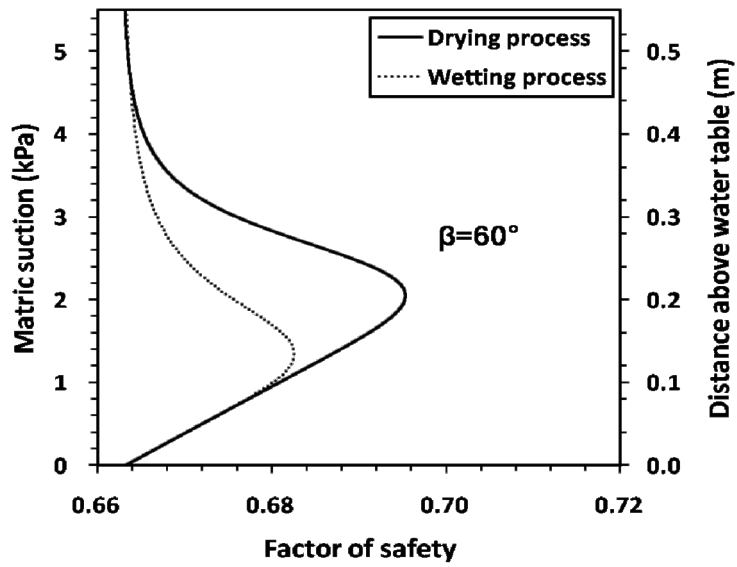
(a) Slope angle(β)=30°



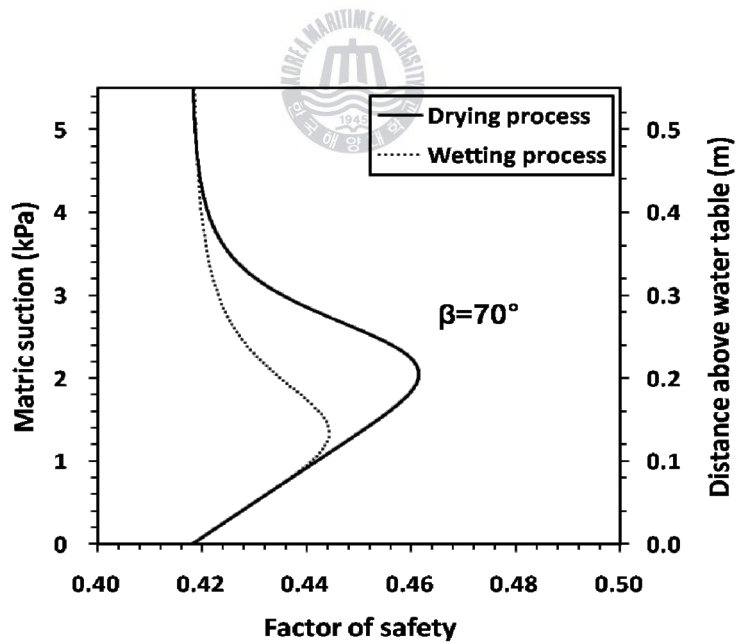
(b) Slope angle(β)= 40°



(c) Slope angle(β)= 50°



(d) Slope angle(β)= 60°



(e) Slope angle(β)= 70°

Fig. 4.22 Variation of factor of safety with suction stress

결과를 통해 알 수 있듯이, Fig. 4.20의 흡입응력특성곡선과 Fig. 4.21의 흡입응력에 따른 안전율 변화곡선은 서로 같은 양상을 나타내며, 불포화지반 강도는 외부에 다른 응력작용 없이 오로지 흡입응력에 영향을 받는다는 사실을 입증해 준다. 즉, 지하수위로부터 약 0.86m까지 흡입응력의 영향을 받는 불포화영역이며, 그 이상의 높이에서는 더 이상 지하수위의 영향을 받지 않는 건조지반(흡입응력 $\sigma^s=0$)으로 오로지 내부마찰각 항에 의해서 사면의 안정성이 평가됨을 알 수 있다.

건조 및 습윤과정에 대한 사면 안전성을 평가해 본 결과 각각의 깊이별 안전율 곡선은 서로 비슷한 경향을 보이고 있다. 하지만 실제 사면파괴는 지반이 건조한 불포화상태에서 강우 등에 의한 인공적인 요인으로 인해 지반이 점차 포화되며 발생되기 때문에 건조과정 보다는 습윤과정에 따른 시험결과가 보다 더 정확한 지반의 함수특성 및 응력거동특성을 설명해 준다고 사료된다.



제 5장 결 론

본 연구에서는 자동함수특성곡선측정장치를 이용하여 상대밀도 75%의 주문진표준사에 대하여 석션이력을 고려한 건조 및 습윤과정에 따른 함수특성시험을 실시하였다. 그 결과 표준사에 대한 함수특성곡선 및 흡입응력특성곡선을 구할 수 있었으며 지하수위가 존재하는 불포화 무한사면을 가정하여 함수조건에 따른 깊이별 안정성을 평가함으로서 흡입응력이 지반강도에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 본 내용을 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) 자동함수특성곡선측정장치는 시험자에 의해 발생하는 오차를 최소화하고 시간적 제약이 많았던 기존 불포화토 시험장치에 비해 시료의 불포화 흐름 특성을 보다 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 장치임을 확인할 수 있었다.



(2) 본 시험장치는 흙을 탈수시키는 건조과정 및 건조된 흙을 다시 포화시키는 습윤과정에 대한 시험이 가능하여 보다 포괄적인 불포화해석을 수행할 수 있으며 실시간 그림을 통해 시험의 진행과정 및 장기간 시험에서 야기될 수 있는 시험결과의 불확실성을 최소화 하였다.

(3) 시험시료로는 대표적인 주문진표준사가 이용되었으며, 그 결과 일반적인 모래의 특성과 같이 작은 모관흡수력 증가에도 큰 함수비 차이를 보였다. 시험결과를 Brooks and Corey, van Genuchten, Fredlund and Xing 함수특성곡선 제안식에 비추어 해석해 본 결과, 건조 및 습윤과정에 따른 함수특성곡선 사이에서는 뚜렷한 이력현상을 관찰 할 수 있었으며 결정계수 (R^2)를 이용해 시험결과와 각 제안식에 의한 결과를 비교해 본 결과 van Genuchten 모델이 가장 신뢰성이 높다고 판단되었다.

- (4) Lu와 Likos가 제안한 유효응력이론을 적용해 불포화토의 응력상태를 대변하는 흡입응력특성곡선을 구하였으며 이는 함수특성곡선과 밀접한 관계를 가지고 있음을 확인하였다. 그 결과 건조과정의 경우 0~6.3kPa, 습윤과정의 경우 0~8.6kPa의 모관흡수력범위에서 흡입응력의 영향을 받는다고 판단할 수 있었으며 흡입응력은 오로지 잔류체적함수비 이상의 불포화상태에서 존재함을 확인할 수 있었다.
- (5) 흡입응력이 불포화지반강도에 미치는 영향을 보다 거시적인 방법으로 확인하기 위해 시험시료와 동일한 상대밀도 75%의 주문진표준사로 이루어진 무한사면을 가정하였다. 특히 지표면으로 부터 10m 아래에 지하수층이 존재하다고 가정하여 깊이 별 안전율을 살펴 본 결과 사면은 안전 측에 있다고 판단되었으며, 흡입응력이 작용하는 지하수위로 부터의 높이(0.86m)에서는 뚜렷한 안전율에 증가를 보여 흡입응력은 불포화지반의 강도를 증가시킨다는 사실을 확인할 수 있었다.
- (6) 함수특성곡선 실험으로부터 습윤과정과 건조과정에서 모관흡수력과 체적함수비를 비교한 결과 뚜렷한 이력현상을 확인할 수 있었다. 당연히 흡입응력 특성곡선도 이력현상으로 인해 습윤과정과 건조과정에서 서로 다른 값이 제시되었으며, 이를 적용한 사면 안정 해석결과에서도 이력현상에 의한 차이를 확인할 수 있었다. 그러므로 불포화토의 거동을 파악하는데 있어 이력현상이 고려하기 위해 습윤과정에서는 습윤함수특성곡선을, 건조과정에서는 건조함수특성곡선을 적용하는 것이 합당할거라 여겨진다.

참고문헌

1. 김상규, 류지협, 송진규(1996), “불포화토의 함수특성 측정”, 한국지반공학 회논문집, Vol.12, No.6, pp.139-151.
2. 김찬기(2003), “불포화 풍화 화강토의 응력-변형을 거동 특성”, 대한토목학회논문집, Vol.23, No.3C, pp.177-184.
3. 김태형(2008), “습윤 모래에서 인장강도의 예측(Ⅱ) : 검증”, 한국지반공학 회논문집, Vol.24, No.6, pp.37-44.
4. 성상규, 이인모(2003), “화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직 응력의 영향”, Vol.19, No.2, pp.27-38.
5. 송영석, 이남우 (2010), “자동 흡함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve) 측정장치 구축”, 2010 춘계 지질과학기술 공동학술대회 논문집, pp.62
6. 유남동, 정상섭, 김재홍, 박성완(2004), “강우시 점토함유량에 따른 화강풍화토의 불포화 침투 특성”, 한국지반공학회논문집, Vol.20, No.8, pp.159-166.
7. 이승래, 이성진, 변위용, 장범수(2001), “화강풍화토 지반의 불포화 특성을 고려한 최적화기변에 의한 사면안정해석 방법”, 한국지반공학회논문집, Vol.17, No.6, pp.123-133.
8. 이혜지(2004), “흙이 구조적 특성을 이용한 화강풍화토의 함수특성곡선 유추에 관한 연구”, 한국과학기술원, 석사학위논문.
9. 조성은, 이승래(2001), “불포화 토사사면의 얇은파괴 해석에 대한 비교 연구”, 한국지반공학회논문집, Vol.17, No.4, pp.135-143.
10. 기완서, 김선학(2008), “강우재현 모형실험과 SWCC Cell 실험에 의한 호냄암질 풍화토의 함수특성곡선”, 지질공학 제18권 제4호, pp.359-589.

11. 신길호, 박성완(2006), "풍화계열 사면의 불포화 함수특성곡선 이력이 강우 침투에 미치는 영향“, 한국지반공학회 v.22, no.7, pp.55-64.
12. Bishop, A.W.(1959), "The Principle of Effective Stress", *Techniska Ukeblad*, 106(99), pp.859-863.
13. Bolt, G.H., and Miller, R.D.(1958), "Calculation of total and component potentials of water in soil", *Trans. Am. Geophys. Union* 39, pp.917-928.
14. Brooks, R.H., and Corey, A.T.(1964), "Hydraulic properties of porous media", Colorado State University(Fort Collins), Hydrology Paper, Nr.3, March.
15. Buckingham, E.(1907), "Studies on the movement of soil moisture", U.S. Dept. of Agr. Bur. Soils Bull. 38.
16. Childs, E. C. et Collis-George, N.(1948), "Interaction of water and porous materials", *Soil Geometry and soil-water equilibria. Discussions paraday Soc.* N3, pp.78-85.
17. Cornforth, D.H.(1973), "Prediction of drained strength of sands from relative density measurement", *ASTM STP*, No.523, pp.281-303.
18. Cornforth, D.H.(2005), "Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/preventative Options in Soils", John Wiley and Sons, 596p.
19. Croney, D., and Coleman, J.D.(1961), "Pore pressure and suction in soils", *Proceedings, Conference on Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths, London, pp.31-37.
20. Edlefsen. N.E., and A.B.C Anderson.(1943), "Thermodynamics of soil moisture", *Hilgardia*. 15.
21. Fredlund, D.G., and Xing, A.(1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.3,

pp.521-532.

22. Fredlund, D.G., and Morgenstern, N.R.(1977), "Stress Variables for Unsaturated Soils", Can. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.103, No. GT5, pp.447-466.
23. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, D.A.(1978), "The shear strength of Unsaturated Soils, Canadian J. Geotechnical, Vol.15, No.2, pp.261-276.
24. Jennings, J.E.B., and Burland, J.B.(1962), "Limitation to the use of effective stresses in unsaturated soils", Geotechnique, Vol.12, pp. 125-144.
25. Lu, N., and Godt. J.(2008), "Infinite-Slope Stability under Steady Unsaturated Seepage Conditions", Water Resources Research, Vol.44, W11404, pp.1-13.
26. Lu, N., and Likos, W.J.(2004), "Unsaturated Soil Mechanics", Wiley, New york, 556P
27. Lu, N., and Likos, W.J.(2006), "Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol.132, No.2, pp.131-142.
28. Lu, N., Wu, B., and Tan, C.P.(2005), "A tensile strength apparatus for cohesionless soils", Proceedings of Experts 2005, A. Tarantino et al.(eds.), Balkema.
29. Lu, N., Wu, B., and Tan, C.P.(2007), "Tensile strength characteristics of unsaturated sands", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.133, No.2, pp.144-154.
30. Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B., and Duncan, J.M.(1969), "Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials", University of California Report TE-69-5, Berkeley, California.

31. Mualem, Y.(1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", Water Resource Resarch., Vol.12, No.3, pp.513-522.
32. Richards. B.D.(1965), "Measurement of the free energy of soil moisture by the psychometric technique using thermistors, In moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas", Edited by G.D. Aitchison, Butterworths, pp.39-46.
33. Terzaghi, K.(1943) "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley and Sons Inc., New York.
34. van Genuchten, M.T.(1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Science Society of America Journal, Vol.44, pp.892-898.



감사의글

배움에 대한 열망과 지식의 부족함을 메우기 위해 대학원에 입학한지도 벌써 3년이라는 시간이 흘렀습니다. 길다면 길고 짧다면 짧은 시간, 사회인으로서 직장을 다니며 배움을 익히느라 다소 부족한 면이 있었으리라 생각되지만, 돌이켜 생각해보면 지난 3년간은 저에게 다시금 학창시절의 열정을 느끼며 부족한 제 지식을 한 걸음 더 성장시킬 수 있는 좋은 기회가 아니었나 생각해 봅니다.

지도교수님으로서 저를 대학원으로 인도해 주시고 논문이 완성되기까지 저보다도 더 많이 논문에 대한 애정을 쏟아주신 김태형 교수님께 깊은 감사와 존경의 마음을 전하고 싶습니다. 그리고 제 논문에 항상 관심을 가져주시고 학문적으로도 많은 가르침을 주신 서영교 교수님과 여러모로 많이 부족한 제 논문의 질과 완성도를 위해 많은 조언을 아끼지 않으신 한국지질자원연구원의 송영석 박사님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 산업대학원생인 저에게 질책과 독려 그리고 많은 조언을 해주신 김태곤 교수님, 이중우 교수님, 김도삼 교수님, 경갑수 교수님께도 감사의 인사를 전합니다. 그리고 논문을 위해 많은 노력과 시간을 할애해준 연구실 후배 이남우, 황웅기, 이영준, 윤성규군과 정수정양에게도 고맙다는 말과 감사의 마음을 전합니다.

그리고 직장 생활중에서도 학업을 할수 있도록 배려해 주시고 응원해주신 강신화 지사장님, 윤철희 본부장님, 김양수 소장님께 진심으로 감사드립니다.

좀 더 능력있는 기술자가 되도록 최선을 다하겠습니다.

2010년 08월
이 선 룡 올림